



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL TAPIAL ANTE SISMO A TRAVÉS DE ENSAYOS DE VIBRACIONES AMBIENTALES Y EL PROGRAMA SAP2000. EL CASO DE LA MURALLA DE SEVILLA.

Carmen Núñez Rivera
Junio de 2019

Tutor: Antonio Jaramillo Morilla
Tribunal: B-3
Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Índice

Introducción

1.- Motivación de la investigación. Relevancia y oportunidad.	4
2.- Objetivos generales y específicos.	5
2.1.- Objetivos generales.	5
2.2.- Objetivos específicos.	5
3.- Estado de la cuestión. Reseña histórica.	6
4.- Delimitación del ámbito de estudio. Localización y emplazamiento.	11
5.- Metodología y recursos utilizados.	14
6.- Definición del modelo de estudio.	15
6.1.- Descripción física de la muralla.	15
6.2.- Patologías que presenta.	15
7.- La actividad sísmica en Sevilla.	19
7.1.- Generalidades.	19
7.2.- Reseña histórica sobre la actividad sísmica en Sevilla.	22
7.3.- Análisis de probabilidad sísmica en Sevilla.	30
7.4.- Escalas de intensidad sísmica y vulnerabilidad.	33
7.5.- Aplicación de la Norma Sísmica Española NCSE-02.	37
Ámbito y criterios de aplicación.	37
Información sísmica de Sevilla.	38
8.- Ensayo de vibración ambiental.	40
8.1.- Método aplicado.	40
8.2.- Equipo utilizado.	42
8.3.- Resultados de los ensayos de vibración ambiental.	42
8.4.- Estimación del periodo de la muralla.	43

Desarrollo

9.- Estudio de la muralla mediante la introducción del modelo a SAP2000.	44
9.1.- Características y método de cálculo empleado (método de elementos finitos).	44
9.2.- Levantamiento del modelo.	44
Premisas de partida.	44
Proceso de caracterización. Construcción del modelo en Autocad.	46
Definición de materiales.	47
Definición de secciones.	48
Definición de vínculos.	48
Definición de cargas.	48
Definición de combinaciones.	50

10.- Resultados, análisis y conclusiones.	53
10.1.- Frecuencia y periodos fundamentales de la estructura. Tensiones y deformaciones.	53
10.2.- Relación entre el periodo obtenido mediante vibración ambiental, cálculo y modelo.	55
10.3.- Conclusiones.	56
11.- Continuidad en la línea de trabajo. / Líneas de trabajo en posibilidad de desarrollo.	57
<i>Bibliografía</i>	
12.- Referencias empleadas.	58
13.1.- Bibliografía.	58
13.2.- Leyes y normativa.	59

Resumen.

El presente Trabajo Fin de Grado realiza un estudio sobre el comportamiento del tapial ante el sismo, teniendo como caso de estudio la muralla de la Macarena en Sevilla. Este estudio es posible gracias a la elaboración de un modelo de la muralla introducido en el programa de elementos finitos "SAP2000". El software nos permite realizar un análisis modal y comprobar los movimientos horizontales que se producen en ella. Es un hecho novedoso y de aún poca repercusión el trabajar con programas de discretización de elementos en apartados como el patrimonio, restauración y su difusión. De forma paralela se realiza un trabajo de campo que consiste en la medición de vibraciones ambientales, que nos servirá para corroborar los resultados obtenidos con "SAP2000".

Ambos análisis nos sirven para elaborar dos conclusiones claras. Por un lado, el hecho de manifestar la necesidad de integrar nuevas metodologías al ámbito de la restauración y el patrimonio con el fin de conocer en profundidad los problemas y patologías que nos podemos encontrar en los bienes históricos y hallar la solución más eficiente. Por otro lado, la otra de las conclusiones va referida a las actuales consideraciones que se toman para llevar a cabo obras de restauración en el que pedimos que se elaboren nuevas premisas adaptadas a las características del bien en cuestión.

Palabras clave.

Tapial; Muralla Macarena; Sevilla; SAP2000; análisis modal; vibración ambiental; sismo; patrimonio.

Abstract.

This Final Degree Project carries out a study on the behavior of the tapial before the earthquake. The study case chosen is Macarena wall in Seville. This research is possible thanks to the elaboration of a model of the wall introduced in the finite element program 'SAP2000'. The software enables us to perform a modal analysis and check the horizontal movements. This is a new and little used the fact of working with discretization of elements programs in areas such as heritage and its dissemination. In parallel, a fieldwork is carried out consisting of the measurement of ambient vibrations, which will serve to corroborate the results obtained with the software 'SAP2000'.

Both analyzes help us to draw two clear conclusions. On the one hand, the fact of manifesting the need to integrate new methodologies in the field of restoration and heritage in order to know in depth the problems and find the most efficient solution. On the other hand, we can reconsider some of the considerations that are taken to intervene in historical assets. These premises can be revised and adapted to the different types of construction currently existing.

Key words.

Mud wall; Macarena Wall; Seville; SAP2000; modal analysis; ambient vibration; earthquake; heritage.

1.- Motivación de la investigación. Relevancia y oportunidad.

La Muralla de Sevilla es uno de los bienes inmuebles más importantes de Sevilla debido a que ha sido testigo de la historia de la ciudad durante más de 1000 años. Considerada Bien de Interés Cultural desde 1984 a día de hoy solo se conservan algunos paños en el barrio de la Macarena, más concretamente desde la puerta de la Macarena hasta la puerta de Córdoba, en los Jardines del Valle, en los Reales Alcázares, en la plaza del Cabildo y en la torre de la Plata.

Actualmente en el paño de la Macarena se están empezando a realizar estudios y diferentes ensayos y análisis con el fin de conocer mejor la composición de esta y su estado actual. Este estudio será el preámbulo para desarrollar un proyecto de restauración y consolidación de la muralla en el que se pretende incluir un centro de interpretación. Este proyecto se pretende realizar debido al abandono sufrido durante la última década y a las restauraciones elaboradas durante el último siglo que en algunos casos ha resultado ser perjudicial o insuficiente.



Imágenes 1-2: Muestras del deterioro y la próxima rehabilitación de la muralla de la Macarena. Fuentes: El Diario de Sevilla y El Correo de Andalucía.

Es por esto por lo que escoger como caso de estudio la muralla de la Macarena es una gran oportunidad, ya que los resultados y conclusiones obtenidas en esta tesis podrán servir como estudios complementarios al exhaustivo análisis que se realizará durante este año que discurre. En este Trabajo Fin de Grado se analizará si la puede soportar acciones sísmicas tal y como lo ha venido haciendo anteriormente y cuáles serían las partes más dañadas en este supuesto. Además, calcularemos el módulo de elasticidad, así como los periodos de vibración de esta.

Para ello se introducirá un modelo de la muralla en el software de elementos finitos "SAP2000", el cual está preparado para modelar, realizar análisis modales y dimensionar un amplio abanico de estructuras. En él se analizarían y compararían los resultados obtenidos en el trabajo de campo con los que nos ofrece dicho software, pudiendo elaborar un modelo dinámico de esta y observar sus posibles movimientos horizontales.

De esta forma, podríamos obtener un trabajo muy práctico y específico donde es esencial la toma de datos y el trabajo de campo, pero sin dañar en lo más mínimo el bien. Además, se aportará la discretización de la muralla la cual podría servir en un futuro para profundizar y ahondar en los diferentes problemas que presenta la muralla de forma eficaz.

2.- Objetivos generales y específicos.

La finalidad principal de este estudio consiste en el análisis y comportamiento de la muralla de la Macarena ante el sismo a través de mediciones de vibraciones ambientales y del análisis modal de la muralla en el programa "SAP2000".

2.1.- Objetivos generales.

El objetivo general es aquel que engloba toda una investigación, por lo que en este caso sería:

- Analizar el comportamiento de la muralla de la Macarena ante el sismo.

2.2.- Objetivos específicos.

Los objetivos específicos parten del objetivo general y son los que complementan a este. De esta forma, serían los siguientes:

- Discretización de la muralla a través del programa de elementos finitos "SAP2000" a partir de la simplificación de la realidad.
- Realizar un análisis modal de la muralla a través de "SAP2000" en el que medimos también sus movimientos horizontales.
- Realizar mediciones de las vibraciones ambientales.
- Conocer las características del tapial a la hora de la construcción y si este puede ser apto para la restauración.
- Estudiar cómo ha afectado el sismo en Sevilla a lo largo de la historia y cómo puede afectar en la actualidad.
- Obtener el módulo de elasticidad y el periodo de vibración de la muralla.
- Analizar y comparación de los diferentes resultados obtenidos.

3.- Estado de la cuestión. Reseña histórica.

Para hablar de la muralla de Sevilla es inevitable hablar de la ciudad, de su formación y crecimiento a lo largo de la historia, ya que es esta la que configura los límites de la ciudad dando lugar en parte a la Sevilla que conocemos hoy día.

Sevilla nace de un asentamiento ubicado en lo que es actualmente la zona de la Alfalfa, conocida bajo el nombre de Spal (del fenicio isla de Baal). En el siglo II a.C. este territorio es conquistado por los romanos durante las segundas guerras púnicas, fundando Julio César la colonia Iulia Rómula Hispalis.

Conocemos los primeros resquicios de la muralla a mediados del siglo I a.C, aproximadamente entre los años 70 y 65 a.C. Esta nueva cerca defensiva, tenía como principal finalidad la de reemplazar la muralla cartaginesa formada por una empalizada de troncos de madera y barro. Esta muralla fue ampliada y perfeccionada bajo el imperio de César Augusto (27 a.C – 14 d.C.) debido al rápido crecimiento de la ciudad. Además del cerco, se hallaban 6 torreones ciclópeos para proteger la colonia. A día de hoy, los restos de esta época solo se conservan en la zona de los Reales Alcázares, ya que el material del que se componía fue reutilizado durante la época musulmana.



Imagen 3: Esquema de Hispalis. Fuente: Ortofoto vuelo americano 2015 y aportación propia.

De la época visigoda no se conocen datos acerca del desarrollo de la ciudad o de la muralla, ya sea porque se mantuvo el número de habitantes de la ciudad de forma estable o porque simplemente se continuó con la urbe romana heredada. Esto supone que durante estos años se siguió usando esta fortificación militar, aunque sin signos de ser ampliada, mejorada o remodelada.

En el año 711 se produjo la invasión de la ciudad por parte de los musulmanes. En esta época islámica la ciudad pasó a llamarse Isbiliya. Bajo el dominio del sultán Alí ibn Yusuf, se tuvo más en cuenta el carácter defensivo de la muralla y se amplió el espacio protegido duplicando su antigua superficie.

Hubo pocas transformaciones en la ciudad durante los primeros años del dominio islámico, pero tras el año 844, cuando la ciudad fue arrasada por los vikingos y la muralla fue pasto de las llamas, el emir Abd al-Rahman II mandó reconstruirlas convirtiéndola en una gran muralla de piedra. Se estableció el perímetro de la ciudad, dando como resultado un recinto amurallado de unos 7 km de longitud (lo que en aquella época cuadruplicaba la superficie de la ciudad), haciendo que la ciudad creciese en dirección Suroeste.



Imagen 4: Esquema de Isbiliya en época almorávide. Fuente: Ortofoto vuelo americano 2015 y aportación propia.

En el año 913, fueron nuevamente destruidas por Abd al-Rahman III junto con las puertas de estas por dos motivos: uno de ellos se produce por las primeras construcciones del Alcázar, el segundo motivo era más bien estratégico, para poder evitar conatos de secesión contra Córdoba, capital de Al-Ándalus.

Durante el mandato de Abú al-Qasim, en el año 1023 se volvió a levantar de nuevo las murallas con el fin de protegerse de la reconquista cristiana. Durante los siglos XI y XII, con la presión ejercida por los Reyes Católicos durante la Reconquista, se extendió y fortaleció la defensa de la ciudad. En esta época la muralla poseía unos 7,50 km de longitud, 166 torreones separados a 40 metros, 13 puertas y 6 postigos.¹ Las torres pasan de ser cuadradas a ser rectangulares, y tras unos años octogonales. Además, se decide construir un foso y una antemuralla (conocida como barbacana).

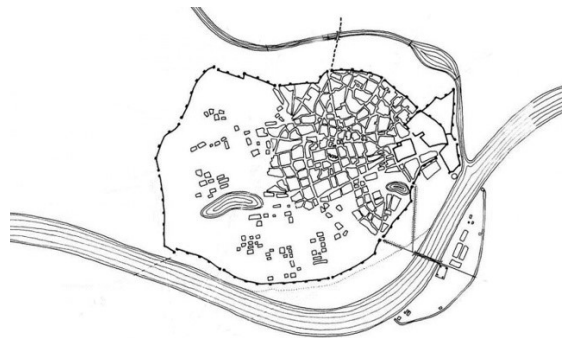


Imagen 5-6-7: Esquemas de Isbiliya en época almohade. Fuente: Ortofoto vuelo americano 2015 y aportación propia.

¹ (Rodrigo Caro, *Antigüedades de Sevilla Lib. I*, pg.20).

Tras la reconquista de Sevilla (a través de un acuerdo de rendición) la Corona de Castilla mantuvo la forma y fisionomía de los muros que habían sido trazados por los árabes años atrás.

En el siglo XVI durante el reinado de Carlos I se realizó una gran remodelación de la muralla. Estas nuevas modificaciones afectaban principalmente a las entradas y puertas de la ciudad, para integrarlas en los nuevos ensanches y para facilitar el acceso de carruajes a Sevilla. Las puertas que se vieron afectadas fueron: la puerta de la Carne, la puerta del Arenal, la puerta de Triana, la puerta de Carmona, el postigo del Carbón y el postigo del Aceite.

Con el paso de los años la muralla deja de tener importancia respecto a su función militar y de defensa. Sin embargo, empiezan a primar otros valores en ella ya sea como protección frente a las crecidas del río Guadalquivir, como función comercial y recaudatorio, puesto que el aislamiento de la ciudad convertía a la muralla en una aduana que regulaba la entrada de personas y mercancías mediante los correspondientes aranceles (fielatos) y como función sanitaria controlando el paso de personas y mercancías durante las epidemias que asolaban en aquella época.

Al dejar de tener función defensiva se levanta la prohibición de no poder construir apoyándose en la muralla y sus muros fueron el soporte de casas y almacenes, sobre todo en la zona de la Macarena, en el que las hasta las torres fueron habitadas.

En el siglo XVIII se vuelven a modificar las puertas de acceso. Se reconstruye la puerta del Arenal y se levanta la puerta de San Fernando, ubicada en torno a la Real Fábrica de Tabacos.



Imagen 8: Esquema de Sevilla en el siglo XVIII. Fuente: Ortofoto vuelo americano 2015 y aportación propia.

A mediados del siglo XIX y como detonante la Revolución de 1868, se comienza a derribar sistemáticamente gran parte de la muralla, debido al crecimiento de la ciudad y al aspecto lamentable en el que se encontraban numerosos paños de la muralla. El aspecto era en muchos casos ruinoso, con numerosos agujeros y utilizada como prácticamente un basurero que degradaba la ciudad.

En el año 1908 y tras entender la muralla como un bien con valor histórico, se declara la zona de la Macarena como Monumento Histórico-Artístico.

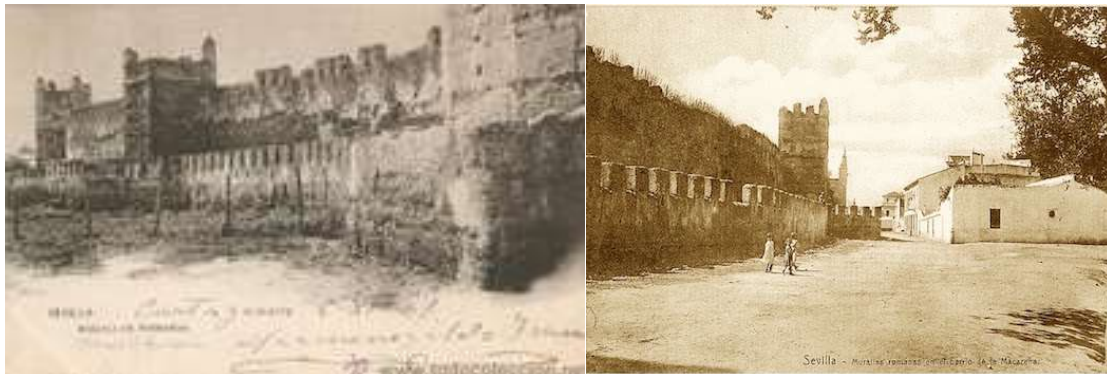


Imagen 9-10: Fotografías históricas de la muralla de la Macarena. Fuente: *Dosieres de Juan de Mata Carriazo*.

En la actualidad se conservan algunos tramos en los Jardines del Valle y en los Reales Alcázares, además del tramo objeto de nuestro estudio, que va desde la puerta de la Macarena hasta la puerta de Córdoba con siete torreones cuadrados y uno hexagonal irregular (la Torre Blanca). Este paño es el mejor conservado debido a que se creía que el tramo era de origen romano, cosa que fue desmentida en 1985 cuando en una excavación arqueológica se encuentran restos del lienzo original datado del siglo XII.



Imagen 11: Esquema de la muralla en la actualidad. Fuente: *Ortofoto vuelo americano 2015 y aportación propia*.

4.- Delimitación del ámbito de estudio. Localización y emplazamiento.

El tramo objeto de esta tesis es tal y como hemos comentado anteriormente el que va desde la puerta de la Macarena hasta la puerta de Córdoba (embebida en la iglesia de San Hermenegildo). Posee una longitud de unos 500 m aproximadamente. Este tramo corresponde a su época almorávide (1091-1147). Tras su construcción fue remodelada aumentando su altura de mano de los almohades (1147-1248).

Durante la primera década del siglo XX se decidió abrir dos nuevos postigos para facilitar el tránsito de personas y vehículos. Esto dio lugar a numerosas protestas, aunque sin demasiado éxito ya que se decidieron construir igualmente como podemos ver en las siguientes fotografías:

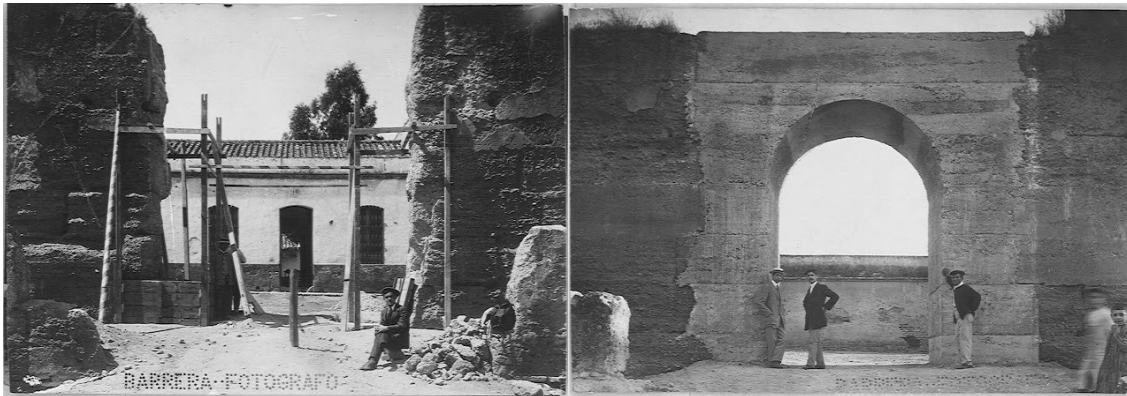


Imagen 12-13: Fotografías de la construcción de uno de los portones de la muralla 1911. Fuente: J. Barrera Fotógrafo.

Ya entre los años 30 y hasta 2007 (fecha de la última fase de rehabilitación) se han realizado múltiples tareas de rehabilitación y restauración siendo siempre labores superficiales de consolidación.

El criterio utilizado en las obras de restauración es la descrita en las Cartas del Restauo que expone lo siguiente:

“en todo caso los nuevos añadidos deben ser cuidadosa y claramente señalados o mediante el empleo de material diferente al primitivo, o con la adopción de marcas de contorno, simples y privadas de talla, o con aplicaciones de siglas o epígrafes, de modo que nunca una restauración realizada pueda conducir a engaño a los estudiosos y representar una falsificación de un documento histórico.”

Los pasos seguidos para llevar a cabo las obras de restauración fueron las siguientes:

- Limpieza de los paramentos de vegetación y líquenes.
- Realización de cajeados para rellenar con nueva masa creando así nuevas zonas de tapial.
- En la barbacana se realizaron movimientos de tierra para mostrar la dimensión verdadera de la muralla, no siendo necesaria ninguna otra actuación debido a su buen estado de conservación.
- En las zonas de cubierta de las torres se colocaron baldosas cerámicas de 14x28 cm, para evacuar las aguas pluviales creando pendientes hacia el exterior.

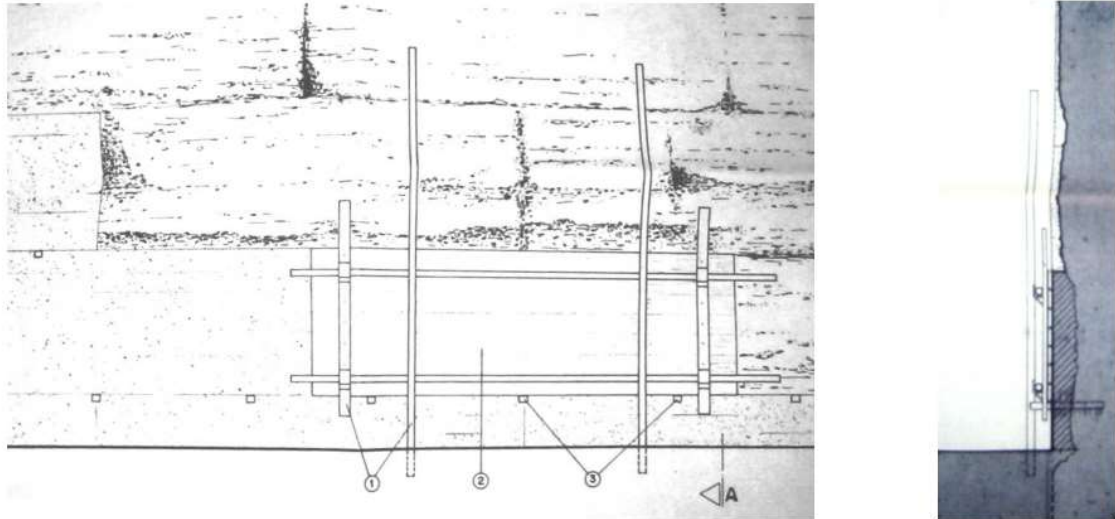


Imagen 14-15: Detalles de los encofrados. Fuente: Proyecto de restauración de José García-Tapia.

Tras 2007 la muralla queda en un estado de falta de mantenimiento y abandono que se refleja en la erosión y humedades de capilaridad que presenta en nuestros días.

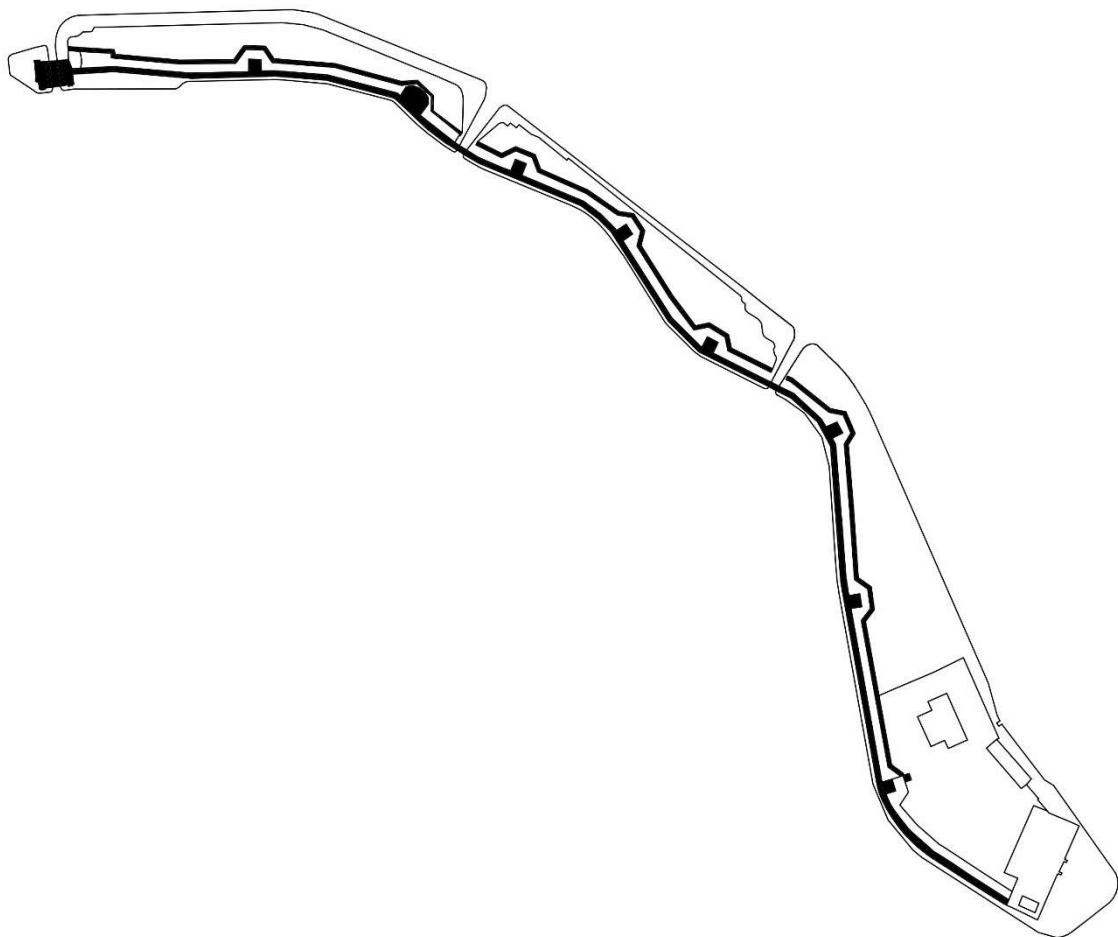


Imagen 16: Planta de la muralla de la Macarena. Fuente: Gerencia de Urbanismo.

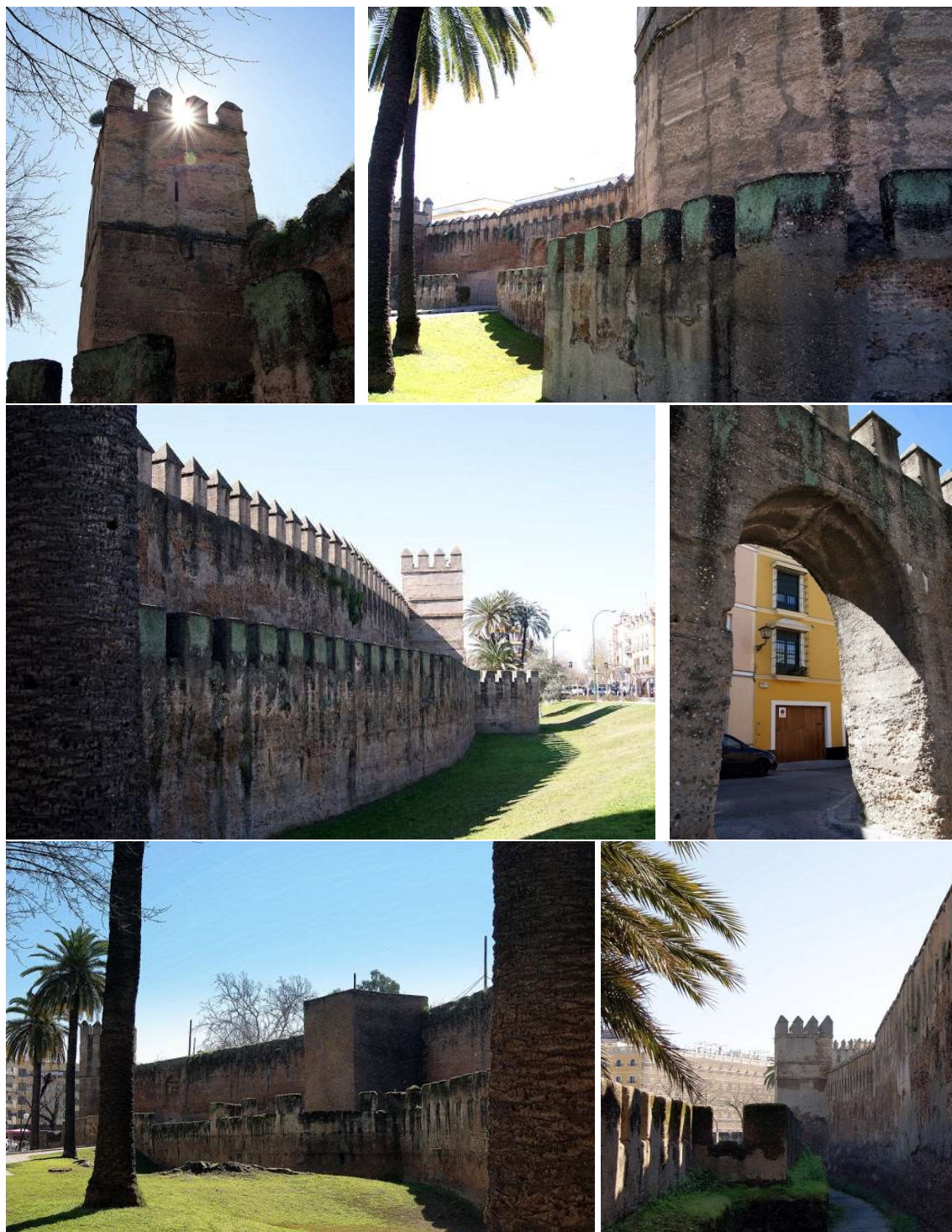


Imagen 17-18-19-20-21-22: Muralla entre la Macarena y la puerta de Córdoba. Fuente: José Becerra.

5.- Metodología y recursos utilizados.

El presente estudio se llevará a cabo mediante tres líneas de investigación paralelas, agrupadas en dos bloques: búsqueda de información bibliográfica y trabajo de campo.

En el primer bloque a desarrollar que será el de búsqueda de información nos centraremos en dos aspectos. Uno de ellos será el conocimiento de la muralla de Sevilla a través de su historia y su caracterización constructiva. Estos datos nos pueden resultar de gran interés para realizar el trabajo de campo de forma que se aproxime lo máximo a la realidad. Otro de los apartados sería el estudio de la actividad sísmica en Sevilla, observar qué acciones sísmicas afectan la ciudad, qué sucesos históricos son interesantes recordar y qué dice la normativa sísmica en lo referente a construcciones de tapial e históricas.

Para realizar esta parte del trabajo tendremos de apoyo la gran bibliografía existente de la muralla de la Macarena como, por ejemplo, en las publicaciones de Rodrigo Caro, Juan de Mata Carriazo o Jacinto Canivell.

Para el ámbito relacionado con las acciones sísmicas podemos documentarnos en la tesis doctoral de Pilar Gentil la cual habla sobre las consecuencias de las acciones sísmicas históricas en la ciudad de Sevilla. También nos serán de gran utilidad los estudios realizados por Jonathan Ruiz Jaramillo y el Instituto Eduardo Torroja. Por último, debemos reseñar la normativa actual española referida a sismo, la NCSE-02 de la que cogeremos algunas de las directrices de cálculo.

En lo referente al trabajo de campo este se centrará en dos subbloques con el fin de realizar una comparativa de los resultados obtenidos, así como unas conclusiones finales.

Por un lado, se realizarán mediciones de las vibraciones ambientales en la muralla para determinar si el nivel de vida que se lleva en la actualidad (principalmente la instauración del uso del automóvil en la ciudad) puede afectar de forma significativa en su conservación. Estas mediciones nos servirán para el cálculo del periodo de la muralla, así como su módulo de elasticidad.

De forma paralela levantaremos la muralla en el programa de elementos finitos SAP2000. En este programa podremos realizar un análisis modal de la fortificación y observar qué consecuencias tendría en ella si se viera afectada por acciones sísmicas. De la misma forma el programa nos dará los periodos de vibración y frecuencias de la muralla. Para que los resultados sean coherentes con lo obtenido en la anterior parte del trabajo de campo es esencial que el modelo que vayamos a introducir se corresponda en la medida de lo posible con la realidad, pero, además debemos tener en cuenta las limitaciones del software e introducir un modelo simplificado.

Ambos bloques de trabajo nos ayudarán a obtener unas conclusiones adecuadas ya que buscan el mismo objetivo común, el poder determinar cuál sería el comportamiento de la muralla ante acciones sísmicas.

6.- Definición del modelo de estudio.

6.1.- Descripción física de la muralla.

Como podemos venir indagando de la reseña histórica la fábrica de la muralla es de tapial, elemento característico de las construcciones almorávides y almohades de los siglos XII y XIII. Su composición puede apreciarse que es homogénea y está originada por la mezcla de tierra con áridos de gran tamaño usando como aglomerante la cal, que, pasado un tiempo adquiere una dureza apta para la construcción. Hay estudios en los que se documenta que es en la época almohade cuando se incorpora el ladrillo en el adarve de las torres. Además, en varios torreones (como en el de la Plata o el Oro) se refuerza la zona baja de la edificación con sillares de piedra.

La parte superior de la muralla se aprecia que es de menor calidad que la inferior, ya que su aglomerante se separa de forma más fácil. También es notorio que la argamasa de la barbacana tiene estas características.

De forma general, podemos decir que la composición de la muralla posee características homogéneas. Su trazado coincide con las estrategias militares del siglo XII, en el que los continuos quiebros hacían más difícil el ataque de los enemigos. También la colocación de los torreones en la muralla coincide con la época. Sus dimensiones son de unos 4 metros de anchura y 4,50 metros siendo de planta rectangular. Los torreones se disponían a una distancia de unos 40 metros y eran proyectadas hacia fuera de la muralla en dirección a la barbacana.

6.2.- Patologías que presenta.

Es importante tener en cuenta las patologías y lesiones que presenta la muralla, ya que puntos afectados por cuestiones de humedad o de erosión podríamos considerarlos como zonas débiles en nuestro modelo de elementos finitos. Esto supondría una disminución en el módulo de elasticidad de los cajones de nuestro modelo que podrían hacer cambiar de forma considerable nuestro análisis modal.

Para describir las patologías que presenta el tramo de muralla nos dirigimos a la obra “Puesta en valor de las fortificaciones de tapial. La muralla de Sevilla” realizada por Jacinto Canivell en el que realiza un estudio sobre ellas.

Las patologías que presenta la muralla podemos agruparlas en los siguientes bloques:

- Humedades.

La muralla presenta principalmente humedades de capilaridad producidas por la ascensión del agua desde la base o cimientos del muro en contacto con zonas húmedas. El agua pasa a través de intersticios microscópicos del material, que facilitan que el agua o sales suban a través de los poros o capilares del muro.

Este fenómeno se presenta ante la existencia de un exceso de humedad acumulado en la base. Esto ha podido llegar a producirse debido a una mala evacuación de aguas pluviales en la liza o debido a una falta de mantenimiento de los sumideros de esta.

El entorno urbano también puede ser una causa de que se produzcan humedades de capilaridad. Recordemos que la muralla se construyó en su mayoría en época almohade donde no estaban rodeadas de pavimentación como a día de hoy. Al colocarse pavimentos asfálticos en su perímetro siendo estos más impermeables que la tierra han podido hacer variar los sitios en los que se producían intercambios de humedad, siendo ahora el muro lo que haga de intercambiador.

Estas humedades se presentan en la muralla en forma de manchas oscuras en las zonas bajas, presencia de sales en las paredes y marcas de humedad.



Imagen 23-24: Presencia de humedades en las zonas bajas de la barbacana y la muralla. Fuente: explorasevilla.es

- Erosión.

La erosión se produce por el desgaste de la superficie del elemento producida exclusivamente por agentes externos y provoca la desaparición progresiva de este.

Es un proceso natural que puede afectar a cualquier elemento debido a que es producida por diversos agentes atmosféricos (como el sol, el agua o el viento). Las erosiones producidas por estos agentes producen alteraciones físicas, en las que principalmente se desprende y se arrastran las partículas de los materiales que conforman el elemento.

La erosión es un hecho que se produce de forma lenta a lo largo de los años, aunque se ha observado que en el último siglo se ha incrementado de forma moderada. Esto es debido a la contaminación atmosférica presente en las ciudades, que crean ambientes más agresivos.

La introducción de los automóviles en las ciudades ha producido un aumento del dióxido de carbono (CO_2) en las ciudades. El dióxido de carbono produce una alteración en el pH del agua haciendo que esta sea más ácida incrementando la disolución de diferentes rocas.



Imagen 25-26-27: Muestras de erosión en la muralla. Fuente: Propia.

- Desprendimientos de material y pérdida de sección.

Esta lesión es producida por la separación de los elementos que conforman el tapial compactado en los cajones. Este tipo de acciones producen pérdida de resistencia de la fábrica además de un enorme deterioro estético.

Los desprendimientos suelen estar producidos por una mala ejecución del tapial o por emplear materiales de mala calidad. También influyen otros factores como la falta de mantenimiento, la antigüedad de la fábrica, su orientación o exposición.

- Grietas y fisuras.

Las grietas y fisuras son aberturas longitudinales en el paramento, que sacan a la luz un mal comportamiento del elemento constructivo. Llamamos fisuras a las aberturas menores a un 1 mm y grietas a las que son mayores.

Aunque sea obvio que las grietas y fisuras se produzcan por un fallo en el comportamiento estructural su origen puede ser muy diverso. Se realiza una subdivisión en los posibles orígenes de una grieta o fisura que son los siguientes:

- Acciones durante la construcción.
- Acciones horizontales.
- Acciones gravitatorias.
- Acciones térmicas.



Imagen 28-29: Fisuras coincidentes con los cajones. Fuente: Propia.

- Eflorescencias.

Las eflorescencias son manchas de tonalidades blancas que se presentan en las fábricas. El origen de estas manchas es debido a las sales que llegan a la fábrica disueltas en el agua, que, pasado un tiempo se cristalizan. Esto puede producirse como una consecuencia de las humedades de condensación descritas anteriormente. Además, pueden provenir también del agua utilizada durante la construcción del muro.

- Suciedad.

En un elemento constructivo la suciedad se produce a raíz del depósito de partículas existentes en la atmósfera en este. Esto se produce debido a la tensión superficial y la rugosidad del material, siendo el agua de lluvia la que “empuja” las partículas al interior de los poros, y, tras saturarse aparece la mancha de suciedad en el paramento.

Este hecho es aún más acusado debido al aumento de partículas en suspensión en la atmósfera por el aumento de la contaminación. Por lo tanto, nuestras fábricas se ven claramente afectadas por ello.

Esta suciedad puede estar formada por múltiples partículas entre las que destacan:

- Polvo de la atmósfera. Son elementos sólidos que pueden ser tanto componentes orgánicos (cenizas, arena, hollín...) como inorgánicos (polen, semillas...).
- Polvo procedente del tráfico rodado. A consecuencia de la combustión de los coches y entre los elementos más comunes se encuentran el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos o compuestos del plomo.
- Polvo procedente de la combustión de las calderas. En los que se encuentran los siguientes compuestos: compuestos sulfurados y nitrogenados, hidrocarburos, monóxido de carbono, cenizas y hollines.



Imagen 30: Suciedad provocada por la combustión de automóviles. Fuente: Jacinto Canivell.

- Causas biológicas.

En causas biológicas nos referimos a la aparición de hongos, mohos, líquenes y plantas en los paramentos de los muros. Se producen principalmente en zonas donde hay poco soleamiento y una humedad continua.



Imagen 31-32-33: Presencia de hongos, líquenes y vegetación en la muralla. Fuente: Propia.

7.- La actividad sísmica en Sevilla.

7.1.- Generalidades.

La actividad sísmica se encuentra de forma intrínseca en nuestras vidas. Continuamente la Tierra se encuentra en movimiento, pero se mueve de forma casi imperceptible de forma que solo en determinadas ocasiones somos conscientes de ello. Los terremotos se originan de forma rápida, instantánea y sacuden grandes áreas de una sola vez causando daños. En los últimos años se han producido terremotos que han costado enormes pérdidas materiales como personales. Algunos ejemplos pueden ser el producido en 2005 en la región de Cachemira (India), los producidos en el año 2010 en Haití, Chile, China y la Isla de Sumatra o el de 2011 producido en Japón en el que su posterior tsunami afectó a la central nuclear de Fukushima poniendo en peligro al resto del mundo.

Las consecuencias de un terremoto pueden ser diversas. Debido a las vibraciones y sacudidas se puede producir: tsunamis, licuefacción, deslizamientos, asentamientos, compactación del terreno y agrietamientos, entre otros.

Los terremotos vienen determinados por la estructura y composición del planeta. No entraremos en detalles sobre la forma y diferentes capas de la Tierra ya que no es el ámbito de nuestra investigación, pero si tendremos en cuenta el estrato que nos concierne para explicar el fenómeno sísmico. La litosfera, que da nombre a la capa más superficial de la Tierra, es aquella comprendida en los cien primeros kilómetros de profundidad.

La litosfera está conformada por una serie de elementos llamados placas tectónicas. Estas placas son las que se encuentran en continuo movimiento gracias a la capa inferior parcialmente fundida debido a las altas temperaturas en las que se encuentran. Cuando dos placas chocan entre sí se produce una gran cantidad de energía que al ser expulsada en forma de ondas hace temblar la superficie terrestre produciéndose lo que conocemos como terremoto. Este fenómeno es conocido como terremoto tectónico que son la causa principal de terremotos en el planeta.

Para dar una definición general y clara nos remitimos a las palabras de Jonathan Ruiz Jaramillo en su tesis doctoral “Comportamiento sísmico de edificios históricos. Las iglesias mudéjares de Sevilla.” que declara lo siguiente:

“... podemos decir que un terremoto o seísmo (sismo, en algunas zonas se considera un terremoto de menor magnitud) consiste en un temblor de tierra o sacudida del terreno que se produce debido al choque de las placas tectónicas y por la liberación de energía en el curso de una reorganización o búsqueda de equilibrio de los materiales que componen la corteza terrestre, que se produce de forma brusca al superar el estado de equilibrio mecánico. Esta situación de inestabilidad es consecuencia de la liberación de liberación de energía potencial elástica acumulada por la actividad tectónica o volcánica de la corteza terrestre.”

Tal y como hemos comentado anteriormente los terremotos más importantes son los de origen tectónico debido a que el 90% de los terremotos globales son de dicho origen. Es por ello por lo que a continuación explicaremos el porqué se producen dichos terremotos: las fallas.

Una falla es un espacio de fractura de la litosfera donde se originan desplazamientos. Los terremotos tectónicos se producen al fracturarse la roca y desplazarse hacia puntos más débiles.

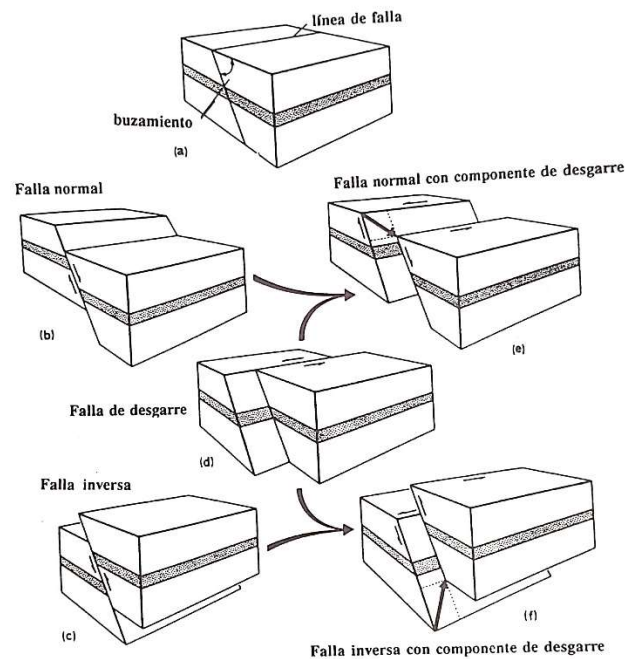


Imagen 34: Tipos de falla. Fuente: Vidal Sánchez, F. "El estudio de los terremotos en Almería".

Las fallas se clasifican según el desplazamiento que se produzcan entre ellas, existiendo tres tipos:

- Falla normal. Se denominan también fallas tensionales. En este tipo el bloque superior se desliza descendiendo en la dirección del plano. (b)
- Falla inversa. También llamadas fallas compresionales. El desplazamiento se produce debido a que el bloque superior se desliza descendiendo en la dirección del plano de la falla. (c)
- Falla de desgarre. Denominadas fallas de rumbo, de deslizamiento lateral, de salto en dirección. En ellas un bloque se desliza de forma lateral respecto al otro en dirección al plano de la falla. (d)

La distribución de los terremotos en el planeta puede explicarse gracias a la teoría de la tectónica de placas. En ella se explica que, debido a la división de la litosfera en placas tectónicas, en sus límites se concentran la mayoría de la actividad sísmica, tectónica y volcánica. La velocidad de movimiento está relacionada con la sismicidad de forma proporcional, a mayor velocidad de convergencia entre placas mayor grado de sismicidad presenta la zona.

En las siguientes imágenes realizamos una comparativa entre las placas tectónicas existentes en la litosfera con un mapa de sismicidad de la Tierra.

Se puede apreciar de forma clara la relación entre los bordes de las placas coinciden con las zonas de mayor sismicidad y actividad volcánica.

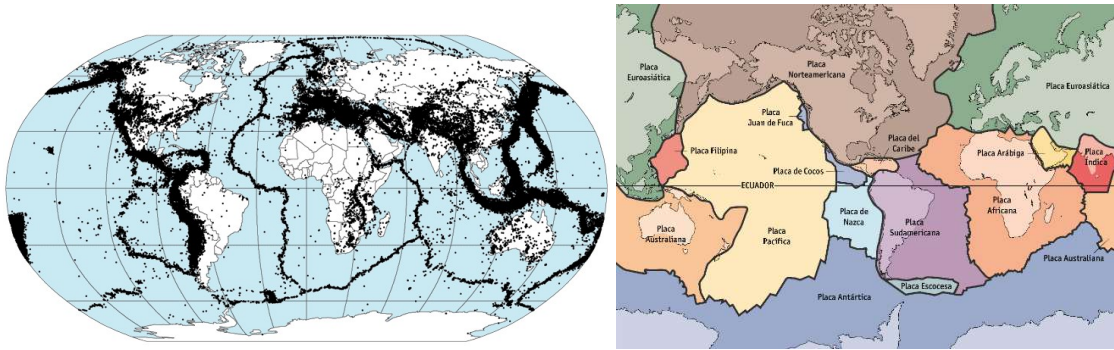


Imagen 35-36: Mapa de sismicidad de la Tierra y mapa de placas tectónicas de la litosfera. Fuente: Wikipedia.

Con las imágenes anteriores podemos hablar de la actividad sísmica de la Península Ibérica. Vemos que la Península se halla cerca del borde límite de placas Euroasiática y Africana por lo que España tiene un riesgo moderado de sismo. El límite de placas sigue una dirección Oeste-Este que va desde las islas de las Azores cruzando todo el mar Mediterráneo hasta llegar a la altura de Turquía. Es el movimiento entre estas dos placas las causantes del grado de sismicidad del norte de África, Italia, Grecia o Turquía. A pesar de estar a una distancia del límite de placas parecidas la velocidad del desplazamiento entre placas es el doble que en España (10 mm/año frente a los 5 mm/año de España).

Aunque la velocidad sea menor podemos observar que comprobando la cronología de sismos en el país la sismicidad es moderada. El último terremoto de magnitud considerable fue el producido en la localidad de Lorca (Murcia) el pasado 2011 con una magnitud de 5,1 en la escala de Richter o el producido en 2016 con una magnitud de 6,3 en el Mar de Alborán que logró causar múltiples desperfectos en Melilla. Pero, para apreciar los terremotos de mayor magnitud nos debemos remontar al año 1755 en el conocido terremoto de Lisboa en el que destruyó la ciudad portuguesa y varias españolas dejando un total de casi 100000 muertos o al año 1884 en el terremoto de Alhama de Granada con una magnitud de 6,2-6,5.

En la Península Ibérica las zonas con mayor grado de sismicidad corresponden a la zona Sur de esta (especialmente la provincia de Granada) y a los Pirineos, poseyendo así España un riesgo moderado de sismo. El mapa refleja las aceleraciones sísmicas (a/g) esperadas para un periodo de retorno de 500 años. La aceleración sísmica de Sevilla es de 0,07 que se encuentra en unos valores normales.

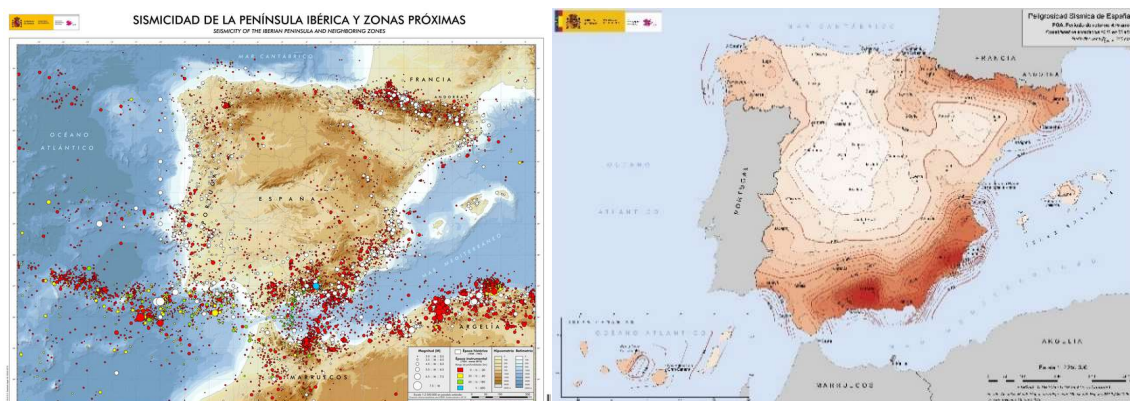


Imagen 37-38: Sismicidad de la Península Ibérica y peligrosidad sísmica de España. Fuente: IGN.

En la imagen 37 nos encontramos con los terremotos ocurridos en la Península Ibérica y en las zonas próximas a ella. Se puede apreciar como gran cantidad de los terremotos coinciden con la zona límite entre placas llamada fractura Azores-Gibraltar. Las magnitudes de los sismos han llegado a ser superiores a 8.

A partir de 13° O y hasta los 5° O (estrecho de Gibraltar), los terremotos son producidos por fallas inversas. Esta sería la zona donde se produjo el terremoto de Lisboa de 1755. Entre los 9° y 7° O los sismos se encuentran más dispersos y de profundidad intermedia. Ya, por último, en la parte final de la fractura Azores-Gibraltar nos encontramos con una sismicidad moderada con una magnitud menor (6,5), como el terremoto de Andalucía de 1884.

7.2.- Reseña histórica sobre la actividad sísmica en Sevilla.

Para realizar un estudio sobre el riesgo sísmico de una zona es necesario realizar una cronología sobre los terremotos ocurridos a lo largo de la historia. Para recoger una cronología acertada sobre la ciudad de Sevilla recurrimos al estudio de Pilar Gentil Govantes “El riesgo sísmico de Sevilla” del que extraemos la siguiente, para apreciar, a título de curiosidad que la actividad sísmica en Sevilla ha sido intensa.

Fecha	Intensidad	Intensidad máxima	Magnitud	Referencias
1700 a.C				Bonsor, 1918
206 a.C				Bonsor, 1918
881-05-27	X			Poirier y Taher, 1980 – Huici A. 1964
881-06-10	VI	XI-XII		Galbis Rodríguez, J., 1932 Hernández Pacheco, 1900 Moreira de Mendoça, 1758
		X-XI		Navarro Neumann, 1920 Conde, 1820
1024		VIII-IX		Poirer and M.A. Taher, 1980 Galbis de M.M. Antuña, 1932 A. Huici, 1964
1079	VIII	IX		Poirier y Taher, 1980 Levi Provençal, E., 1931
1080	VII	IX		Galbis Rodríguez, J., 1932 Hernández Pacheco, 1900
		VIII-XII		Navarro Neumann, 1920
		XI		Montandon, F., 1953 - A. Huici, 1964
1169	VII	VIII		Huici A. 1963 Galbis Rodríguez, J., 1932
1302	>VI			Palomo, F., 1978 Ortiz de Zúñiga, D., 1677
1355-08-24				Gestoso, J., 1889-1892 Chueca, 1965 – Guerrero Lobillo
1356-08-24	VIII	IX		Laredo Quesada, 1976 Hazaña, 1930-31 – Matute, 1866 Moreira de Mendoça, 1758
		V-VIII		Milne, J., 1899 Navarro Neumann, 1920
		X-X ^{1/2}		Montandon, F., 1953 – Galbis, J., 1932 López de Ayala, 1356

Fecha	Intensidad	Intensidad máxima	Magnitud	Referencias
1357-05-14	>VII	IX		Perrey, A., 1847 – Sieberg, A., 1932
1373				Ladero, 1976
1375				Ortiz de Zúñiga, D., 1677 Guichot, 1875-1892 Archivo de la Catedral Muñoz Torrado, 1914
1386	VI			Muñoz Torrado, 1914
1394-08-24				Ladero Quesada, 1976 – Morgado, 1587 José María de Mena – Caro, R., 1634
1396-08-24				Ortiz de Zúñiga, D., 1677 – Galbis, 1932
	VII-VIII			D' Appolonia et al, 1974
	V-VIII			Navarro Neumann, 1917- 1920 Moreira de Mendoça, 1758 Hazaña, 1930
1400-08-24				Galbis, 1932
	VII			D' Appolonia et al, 1974
1431-04-24	VII	VIII		Ortiz de Zúñiga, D., 1677 Castro Palacios
1464	IX-IX ^{1/2}			Montandon, F., 1953 – Palomo, F., 1978
1466				Ortiz de Zúñiga, D., 1677 Navarro Neumann, 1920 D' Appolonia et al, 1974
1494-01-27	>VI			González Jiménez, 1981
1504-06-05	VIII	IX		Espinosa de los Monteros, 1627 Palomo, F., 1978 – Tumbo Guía de Carmona – Castro Palacios Morgado, 1587 – Gestoso, 1889-1892 Ortiz de Zúñiga, 1677 – Galbis, 1932 D' Appolonia et al, 1974 Hernández Pacheco, 1918
		X ^{1/2}		Montandon, F., 1953 Archivo de la Catedral
	VIII-XII			Navarro Neumann, 1920 Milne, 1899
	IX-X			Caro
			7	Fernández López, M., 1886 Udías et al, 1976 Falcón Márquez, 1980 Zurita, J., 1610 – Bernáldez, A., 1875 Espinosa de los Monteros, 1627
1504-06-21				Palomo, 1978 Espinosa de los Monteros, 1627 Navarro Neumann, 1917-1920 D' Appolonia et al, 1974 Galbis, 1932 – Morgado, 1587
1511				Bernaldez, 1972
1518				Falcón Márquez, 1980
1522-09-22	V			Palomo, 1978 – B. Capitular Archivo Municipal
		VIII		Navarro Neumann, 1920

Fecha	Intensidad	Intensidad máxima	Magnitud	Referencias
		X ^{1/2} -XI		Montandon, 1953
1531-01-26		VIII-XII		Navarro Neumann, 1917
1564	V			Galbis, 1940
1594	V			Morales Padrón
1608-03-21				Galbis, 1932
1624-05-11	V-VI	>VIII-IX		Galbis, 1932
	V			Navarro Neumann, 1920
	>VI			Moreira de Mendonça, 1758 Poirier and Taher
1680-10-09	VI-VII	X-XI		Domínguez Ortiz – Aguilar Piñal
	VII-VIII	X ^{1/2}		Montandon, F., 1953
		IX		Navarro Neumann, 1920 Guichot, 1875 - 1892
	IX			Ortiz de Zúñiga, 1677 Sieberg, 1932 – Galbis, 1932 Moreira de Mendonça, 1758
			>7	Udías et al, 1976 Archivo Catedral, Ac. Cp. 1680
		IX		Udías et al, 1980
1693-06-07	V-VI			Ortiz de Zúñiga, 1677 Archivo Catedral, Ac. Cp. 1693
1714-11-04	IV-V			Galbis, 1932 - Navarro Neumann, 1920
1714-11-05	IV-V			Navarro Neumann, 1920
1715-04-02	IV-V			Navarro Neumann, 1920
1724-02-27	VI			Navarro Neumann, 1920 Moreira de Mendonça, 1758
	VI			D' Appolonia et al, 1974
		IX		Pereira de Sousa, 1916
1732-02-10	V			Matute, 1866 - Galbis, 1932
		Hasta V		Navarro Neumann, 1920 – Milne, 1899
	IV			D' Appolonia et al, 1974 – Perrey, 1847
1738-10-29	V			Matute, 1866 - Galbis, 1932 Archivo Catedral, Ac. Cp. 1738
1748-09-22	V-VI			Matute, 1866 - Galbis, 1932
1748-10-07	IV			Galbis, 1940 - Navarro Neumann, 1920
1749-09-22	V			D' Appolonia et al, 1974
1753-09-20				José María de Mena
1755-11-01	VIII	XII	(8,5-9)	Matute, 1866 D. Ortiz y Aguilar Piñal, 1972 Gestoso, 1889-1892 Guía de Carmona
			(8,9)	Martínez Soleres et al, 1979

Fecha	Intensidad	Intensidad máxima	Magnitud	Referencias
				Udías et al, 1976 Archivo Catedral, Ac. Cp. 1755 D' Appolonia et al, 1974 – Galbis, 1932
		VIII	XII	Navarro Neumann, 1917-1920
		XI		Montadon, 1953- Mariana, 1822 Castro, 1858 – Perrey, 1847 Moreira de Mendoça, 1758
1755-11-08	V-VI			Matute, 1866 - Galbis, 1932 Perrey, 1847 Moreira de Mendoça, 1758
		V-VIII		Navarro Neumann, 1917-1920 Archivo Catedral, Ac. Cp. 1755
1755-12-11	VI-VII			Navarro Neumann, 1920
1763-10-11	>VI			Matute, 1866 - Galbis, 1932 Archivo Catedral, Ac. Cp. 1763
1766-06-16				José María de Mena
1772-06-05				José María de Mena
1773-04-12	V			Matute, 1866 – D. Ortiz y A. Piñal J. de Mena Archivo Catedral, Ac. Cp. 1773
1791-11-27	IV			Galbis, 1932 – José María de Mena Archivo Catedral, Ac. Cp. 1791
1816-02-02	VI			Cuenca Toribio
		VII		Karnik, 1971
1841-08-04	IV-V			Guichot, 1875-1892 – Galbis, 1932
1841-08-07	V			Galbis, 1932 – Perrey, 1847
1847-07-28	VI	VIII		Cuenca Toribio - Galbis, 1932
	Hasta V			Navarro Neumann, 1920 – Milne, 1899
		IX		Montandon, 1953
1855-10-11	IV			D' Appolonia et al, 1974
1856-01-12		VIII		Karnik, 1971
1856-06-02	VI			Galbis, 1932 – Perrey, 1847 Diario “El Porvenir”, 1856
1858-10-11	IV			Galbis, 1932
1858-11-11	VI			C. de Prado, 1863 Archivo Catedral, Ac. Cp. 1858
		IX		Karnik, 1971 – Hilarion Jimeno, 1901 Guichot, 1875-1892
	V-VIII			Navarro Neumann, 1920 – Milne, 1899
		X		Montandon, 1953 Diario El Progreso, 1884 Diario “La Andalucía”, 1858 Diario “El Porvenir”, 1858

Fecha	Intensidad	Intensidad máxima	Magnitud	Referencias
1860-03-12	IV			Galbis, 1932 – Perrey, 1847 Diario “La Andalucía”, 1860
1862-08-22	VI			D’ Appolonia et al, 1974 – Galbis, 1932
	V-VIII			Milne, 1889 – Karnik, 1971
1883-10-20	V			Guichot, 1875-1892 Falcón Márquez, 1980 Diario “La Andalucía”, 1883 Diario El Progreso, 1883 Diario “La izquierda liberal”, 1883 Diario “El Porvenir”, 1883
1884-12-25	V-VI	X-XI		Beles y García Yagüe Guichot, 1875-1892
		IX	6,8	Udías et al, 1976 – Karnik, 1971
		XI		Montandon, 1953
	VI	X		Navarro Neumann, 1920 – Galbis, 1932
		VIII-XII		Milne, 1899 - Diario “La Andalucía” Diario “El Progreso” Diario “El tribuno” Diario “El Porvenir”
1888	VI			Cuenca Toribio
1893-09-30	V			Navarro Neumann, 1920 Galbis, 1932 – Paul, 1893
1901-04-24	IV-V			Galbis, 1932 – Barras, 1901 “El Noticiero Obrero”, 1901
1903-08-09	III-IV			Barras, 1903
1903-09-28	IV	VIII		Navarro Neumann, 1920 Galbis, 1932 – Barras, 1903
1909-04-23	VI	IX		Galbis, 1932 - Navarro Neumann, 1920 Calderón, 1901 – Comas y Sola, 1909 Diario “La Andalucía Moderna”, 1909 Angot, A., 1909 – Diario “Sevilla”. 1909 Diario “El Porvenir” Diario “El Correo de Andalucía” Diario “El Noticiero sevillano”
1912-06-11	IV-V	VI		Galbis, 1932 - Navarro Neumann, 1920 Pereira de Sousa, 1914
1918-03-11	III-IV			Galbis, 1932 – Tenorio, 1918
1918-04-20	V-VI			Galbis, 1932 – Barras, 1918
1918-04-26	IV			Galbis, 1932 – Tenorio, 1918
1926-08-15		VI-VII		Galbis, 1932 – Rey Pastor Diario “El Noticiero sevillano”, 1926
1929-03-28	V			Galbis, 1940
				Navarro Neumann Diario “El Noticiero sevillano”, 1930 Diario “El Correo de Andalucía”
1930-07-05	V	VIII		Galbis, 1940 - “El Noticiero sevillano”, 1930 Diario “El Correo de Andalucía”, 1930 La Unión, 1930 – ABC, 1930

Fecha	Intensidad	Intensidad máxima	Magnitud	Referencias
1932-02-05	IV-V			Galbis, 1940 – Rey Pastor
				Estrasburgo Diario “El Correo de Andalucía”, 1932 Diario “El Noticiero sevillano”, 1932 La Unión, 1932 – ABC, 1932
1932-12-29	III			Galbis, 1940
1936-10-12	IV-V			Guichot, 1875-1892
1946-09-05	IV			D' Appolonia et al, 1974
1951-03-10	IV-V			Correo de Andalucía – Diario Sevilla
1964-03-15			6,8	Bureau C. de Seismologie, 1953-65 Nicolás Salas -ABC Diario Sevilla
			6,9	B.S.P. El correo de Andalucía
	V	VII	7,1	Udías y López Arroyo, 1964
1964-07-19			3,0	B.S.P.
1968-04-18	NA			D' Appolonia et al, 1974
				B.S.P.
1969-02-28	VI		8	Udías et al, 1976
			7,3	UNESCO – Nicolás Salas López Arroyo y Udías, 1972 ABC, 1969 El correo de Andalucía, 1969
1969-02-28				UNESCO
1969-06-02	III			D' Appolonia et al, 1974 – B.S.P.
1969-07-06			3,8	D' Appolonia et al, 1974
1969-07-06				B.S.P.
1969-09-06	IV		5,5-5,7	B.S.P.
1970-03-04	III-IV	VI	4,8	UNESCO D' Appolonia et al, 1974 – B.S.P.
1975-12-07				B.S.P.
1975-12-13			4	B.S.P.
1975-12-20			4,1	B.S.P.
1976-03-16			3,6	B.S.P.
1977-05-03			4,1	B.S.P.

Fecha	Intensidad	Intensidad máxima	Magnitud	Referencias
1977-10-10				B.S.P.
1978-01-07				B.S.P.
1978-08-14				B.S.P.
1980-12-03	III-IV			
1997-06-08			3,7	El País
2000-12-13			4,1	El País
2002-12-10			4,4	El País
2005-02-20			4	El País
2007-02-12			6,1	El País
2007-08-12			5,1	El País

* Las celdas en gris (a partir de 1980) no proceden de la tesis de Gentil Govantes.

A parte de ver la actividad sísmica de la ciudad, este cuadro también pone de manifiesto que la muralla de la Macarena ha tenido que ser afectada de algún modo, ya que es una de las construcciones más antiguas de la ciudad.

De los terremotos que aparecen en la anterior tabla, explicaremos a continuación los más relevantes en la historia de Sevilla. Estos son: el producido el 24 de agosto de 1356 (intensidad de VIII en Sevilla), el terremoto de Carmona de 1504 (intensidad de VIII en Sevilla) y el terremoto de Lisboa de 1755 (intensidad de VIII en Sevilla).

- Terremoto de 1356.

Producido el 24 de agosto de 1356 este terremoto tenía como epicentro el Cabo de San Vicente. Este sismo afectó a toda la Península Ibérica, además de otros países. En Sevilla se considera uno de los terremotos más importantes de la historia de la ciudad puesto que asoló la ciudad.

Muchos son los historiadores que documentan este terremoto en sus escritos tanto como por las consecuencias en las edificaciones como en la población. El hecho más conocido es la caída del remate que coronaba la Giralda (denominado Yamur) por la rotura del vástago que lo sustentaba. El edificio permaneció con un campanario sencilla hasta la construcción del remate proyectado por Hernán Ruiz. Esto puede verse reflejado en los textos de Rodrigo Caro que dicen *“Y así quedó la torre como ellos la avían poseído, entera y con sus manganas de metal sobredoradas, hasta que el día de S. Bartolomé, hubo un gran temblor de tierra en esta ciudad, de modo que la barra de hierro en que estaban fixas las cuatro manganas, se desmembró y cayó de la torre, y con ella sus cuatro manganas, que se hizieron pedazos, y en este modo estuvo este edífizio, hasta que por los años de 1550, don Christoval de Valdés Argobispo desta ciudad, y el Deán y Cabildo de la Santa Iglesia hizieron edificar y sobreponer el remate y ornamento conque oy la vemos y gozamos (...)”*.

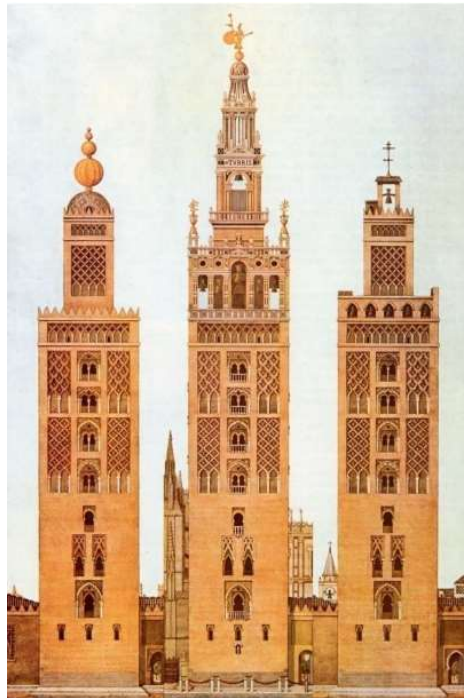


Imagen 39: Evolución de la Giralda. Fuente: Guichot y Parody, A. (1910).

- Terremoto de 1504.

Denominado también “el terremoto de Carmona” puesto que su epicentro se localiza allí. Es uno de los terremotos que más asoló España en el pasado. Se produjo el 5 de abril de 1504.

Este terremoto afectó de forma considerable gran parte de la provincia sevillana, y con menor intensidad el resto de Andalucía, Castilla e incluso el norte de África. Las consecuencias de este sismo han sido registradas por muchos cronistas de la época de los cuales destacamos los daños que se producen en la capital hispalense. Según Bernáldez *“en Sevilla (...) mató dos o tres mujeres luego, e fueron muchas personas, hombres e mujeres descalabrados (...)”*. Se observan unas grandes pérdidas personales, que también se observa en las edificaciones *“las bóvedas de los templos, los techos de las casas y los encalados de las paredes, principalmente en este magnífico y suntuoso templo y en otros edificios sagrados se caían a pedazos (...)”*. *“(...) en muchas partes de la ciudad ovo muchos edificios estremecidos e hendidos, e caídos asimismo en otros muchos lugares desta Vandalucía”*. *“Se hundieron las techumbres de la Iglesia de San Francisco y San Pablo, también se agrietó en muchas partes la nueva catedral que estaba entonces construyéndose (...)”*. En lo referente al terreno numerosas narraciones explican lo que se conoce como proceso de licuefacción como por ejemplo *“En Sevilla hubo salida de agua y fangos por agujeros redondos (cráteres) (...)”*.

- Terremoto de 1755.

También conocido como “el terremoto de Lisboa” se produjo el 1 de noviembre de 1755. Es el último terremoto conocido hasta la fecha que afectó a toda la Península Ibérica en su totalidad, considerándose como el terremoto más grande producido en la historia de Europa.

En su tesis, Gentil Govantes, realiza un análisis completo sobre los daños causados en la ciudad de Sevilla. A pesar de los escasos daños personales (se cree que murieron en torno a la decena de personas) los daños en las edificaciones fueron muy cuantiosos. Aparecieron grietas en edificios importantes de la ciudad como son el Alcázar, la Catedral, el Archivo de Indias o la Cárcel Real, además de otros cien edificios diferentes que incluyen iglesias, conventos y hospitales.

Según Guichot, más de la sexta parte del recinto amurallado quedó convertido en solares y ruinas. Gentil realiza una clasificación de los diferentes tipos de daños para luego extraerlos en porcentajes con respecto a todas las edificaciones en cada collación realizando un plano de porcentaje de daños.

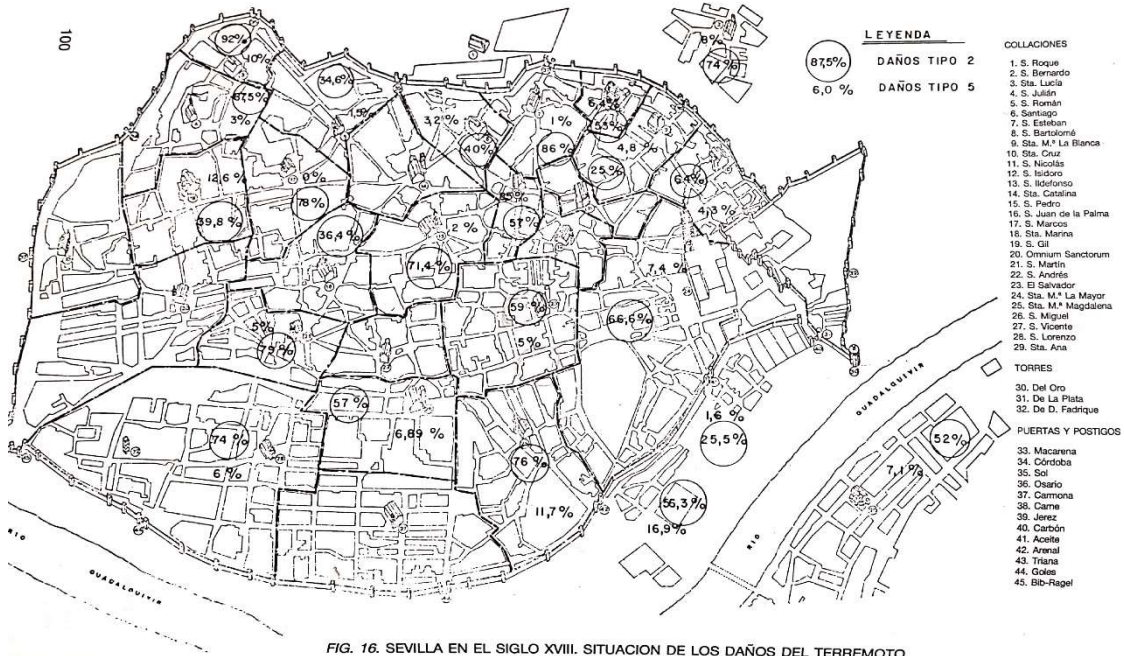


FIG. 16. SEVILLA EN EL SIGLO XVIII. SITUACION DE LOS DAÑOS DEL TERREMOTO

Imagen 40: Proporción de los daños producidos por el terremoto de Lisboa de 1755 en cada una de las collaciones de Sevilla. Fuente: Gentil Govantes, P. (1989)

7.3.- Análisis de probabilidad sísmica en Sevilla.

En la tesis de Gentil Govantes obtiene los valores de P (aceleración/Intensidad) para un tipo de terreno III, basándose en las distribuciones de frecuencia y aceleraciones obtenidas por Jaramillo Morilla en su tesis doctoral² para este tipo de terreno. Además, calcula la probabilidad de que se exceda en Sevilla una determinada aceleración para periodos de tiempo de entre 50 y 500 años.

² Jaramillo Morilla, A. (1983). *Método probabilista e integrado de estimación de las acciones sísmicas*.

TABLA VIII
PROBABILIDAD DE QUE LA INTENSIDAD SEA $\geq I_i$ EN SEVILLA

I_i	T_s (años)	P (%)		
		t (años) 50	t (años) 200	t (años) 500
$\geq VIII$	225	19.96	56.96	89.22
$\geq VII$	50	28.43	73.76	96.43
$\geq VI$	27	84.84	99.94	99.99
$\geq V$	10	99.48	100.00	100.00
$\geq IV$	6	99.98	100.00	100.00

TABLA IX
PROBABILIDAD DE QUE LA INTENSIDAD SEA I EN SEVILLA

I	P (%)		
	t (años) 50	t (años) 200	t (años) 500
$VIII \leq I(VIII) < IX$	19.94	58.93	89.19
$VII \leq I(VII) < VIII$	10.52	35.89	67.08
$VI \leq I(VI) < VII$	78.57	99.79	99.99
$V \leq I(V) < VI$	96.13	99.99	100.00
$IV \leq I(IV) < V$	100.00	100.00	100.00

Imagen 41: Tablas de probabilidades de que la intensidad sea x en Sevilla. Fuente: Gentil Govantes, P. (1989)

De estas tablas podemos decir que la probabilidad con la que se produzcan terremotos que una magnitud considerable es elevada. Otra de las conclusiones que podemos sacar de estas tablas es que mientras más tiempo pase sin que se haya producido un sismo de importancia, más probabilidades existen de que este ocurra.

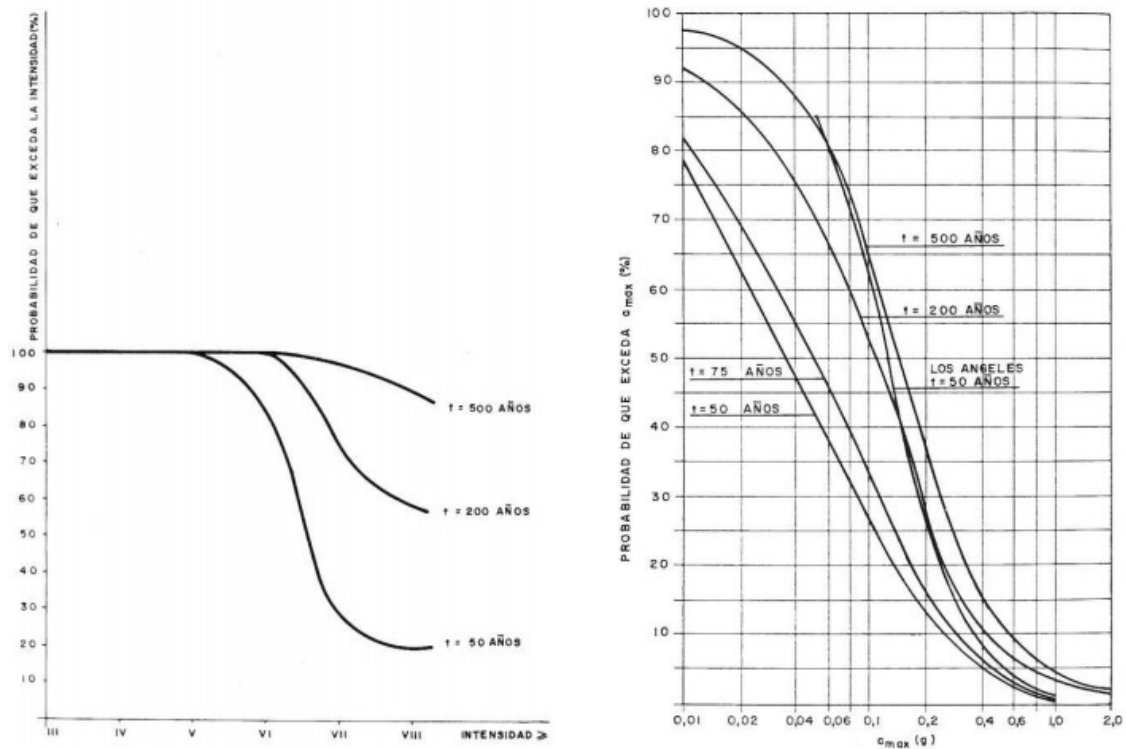


Imagen 43-44: Riesgo sísmico en función de la intensidad y la vida de la estructura y Probabilidad de que se exceda una aceleración de pico en Sevilla. Fuente: Gentil Govantes, P. (1989)

Con estas gráficas vemos que los periodos de retorno de sismo son superiores a la media de vida de un ser humano (superiores a 100 años). Esto hace que no exista una “conciencia de riesgo” en la población y se crea que no es posible que puedan tener lugar acontecimientos sísmicos. Se entiende la conciencia de riesgo como la apreciación que un sujeto a nivel individual o colectivamente a nivel de sociedad tiene con respecto a las amenazas que ponen en peligro su pervivencia las cuales están relacionadas con su vulnerabilidad intrínseca poniendo de manifiesto la existencia de un riesgo de desastre.³ La pérdida de la conciencia de riesgo puede producir que no se tomen las medidas necesarias a diferentes fenómenos extraordinarios, como son los terremotos, que puede llevar a la pérdida de vidas humanas y daños materiales.

³ Ruiz Jaramillo, J. (2012) *Comportamiento sísmico de edificios históricos. Las iglesias mudéjares de Sevilla.*

7.4.- Escalas de intensidad sísmica y vulnerabilidad.

Se incluye en este documento una breve descripción sobre las escalas de intensidad sísmica más ampliamente utilizadas a día de hoy con el fin de analizar la vulnerabilidad del elemento utilizado en nuestro objeto de estudio (el tapial), para observar cuál es el comportamiento esperado ante sismos de diferente intensidad.

- Escala de Mercalli.

La Escala de Mercalli fue desarrollada por el científico italiano Giuseppe Mercalli en 1906 a partir de la escala de Rossi-Forel. Posteriormente el científico Adolfo Cancani amplió esta escala pasando de diez a doce grados. Ha sido reformulada en varias ocasiones por científicos y geofísicos como August Heinrich Sieberg, Harry O. Wood, Frank Neumann y Charles Richter. En la actualidad, se conoce como escala de Mercalli modificada (MM).

Es una escala con medidas subjetivas ya que se basa en las apreciaciones de la intensidad sísmica para determinar los diferentes grados. Evalúa la intensidad de un terremoto a partir de los daños producidos en las edificaciones o de lo que sienten las personas.

Escala de Mercalli modificada (MM)		
Grado	Definición	Descripción
I	Muy débil	Imperceptible para la mayoría excepto en condiciones favorables. Aceleración menor a 0,005 m/s ² .
II	Débil	Perceptible solo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios. Los objetos colgantes suelen oscilar. Aceleración entre 0,005 y 0,025 m/s ² .
III	Leve	Perceptible por algunas personas dentro de los edificios, especialmente en pisos altos. Muchos no lo asocian a un terremoto. Los automóviles detenidos se mueven ligeramente. Sensación semejante al paso de un camión pequeño. Aceleración entre 0,025 y 0,06 m/s ² .
IV	Moderado	Perceptible por la mayoría de las personas dentro de los edificios, por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche algunas personas pueden despertarse. Perturbación en cerámica, puertas y ventanas. Las paredes suelen hacer ruido. Los automóviles detenidos se mueven con más energía. Sensación semejante al paso de un camión grande. Aceleración entre 0,06 y 0,10 m/s ² .
V	Poco fuerte	La mayoría de los objetos no sujetos se caen, caminar es difícil, las ventanas pueden abrirse y hacer ruido. Aceleración entre 0,10 y 0,20 m/s ² .
VI	Fuerte	Perceptible para los seres humanos, se hace difícil caminar. Ventanas, platos y cristalería dañados. Los objetos se caen de sus lugares, muebles movidos o caídos. Enfoscado dañado. Daños leves a estructuras. Aceleración entre 0,2 y 0,35 m/s ² .
VII	Muy fuerte	Ponerse de pie es difícil. Muebles dañados. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables en estructuras pobremente construidas. Mampostería dañada. Perceptible por personas en vehículos en movimiento. Aceleración entre 0,35 y 0,60 m/s ² .
VIII	Destruyivo	Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien construidas, posibles colapsos. Daños severos en estructuras pobremente construidas. Mampostería seriamente dañada o destruida. Muebles completamente sacados de lugar. Aceleración entre 0,60 y 1,00 m/s ² .
IX	Muy destruyivo	Pánico generalizado. Daños considerables en estructuras especializadas, paredes fuera de plomo. Grandes daños en importantes edificios, con colapsos parciales. Edificios desplazados fuera de los cimientos. Aceleración entre 1,00 y 2,50 m/s ² .

Grado	Definición	Descripción
X	Desastroso	Algunas estructuras de madera bien construidas quedan destruidas. Aceleración entre 2,50 y 5,00 m/s ² .
XI	Muy desastroso	Pocas estructuras de mampostería, si las hubiera, permanecen en pie. Puentes destruidos. Vías ferroviarias curvadas en gran medida. Aceleración mayor a 5,0 m/s ² .
XII	Catastrófico	Destrucción total con pocos supervivientes. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados. Imposibilidad de mantenerse en pie.

- Escala de Richter.

Esta escala sismológica es también denominada como escala de magnitud local (M_L). Es una escala objetiva y arbitraria ya que de forma logarítmica asigna un número para datar la energía liberada en un sismo.

Escala de Richter		
Grado	Definición	Descripción
< 2,0	Micro	Los microsismos no son perceptibles. Registrado por sismógrafos.
2,0-2,9	Menor	Generalmente no son perceptibles. Registrado por sismógrafos.
3,0-3,9		Perceptibles a menudo, pero rara vez provocan daños
4,0-4,9	Ligero	Movimiento de objetos en las habitaciones que genera ruido. Sismo significativo, pero con pocas probabilidades de producir daños.
5,0-5,9	Moderado	Puede causar daños mayores en edificaciones débiles o mal construidas. En edificaciones bien diseñadas los daños son leves.
6,0-6,9	Fuerte	Pueden ser destructivos en áreas pobladas, en hasta unos 160 kilómetros a la redonda.
7,0-7,9	Mayor	Puede causar grandes daños en extensas zonas.
8,0-8,9	Gran	Puede causar graves daños en zonas de varios cientos de kilómetros. Destrucción total en las comunidades cercanas al epicentro
9,0-9,9		Devastadores en zonas de varios miles de kilómetros.
> 10,0	Épico	Nunca registrado.

- Escala MSK.

La escala Medvédev-Sponheuer-Kárník, es una escala que mide la fuerza de los movimientos de tierra a partir de los efectos que produce el sismo en las construcciones humanas, la población y en el terreno. Actualmente se encuentra en desuso debido a que en la década de los noventa se reformuló y se desarrolló la Escala Macrosísmica Europea, que es la que se emplea actualmente en Europa. Solo se sigue empleando en India, Israel y Rusia.

- Escala Macrosísmica Europea.

Es la escala sismológica más utilizada en el mundo actualmente. Está basada en las directrices de las escalas de Mercalli y MSK. La principal ventaja del empleo de esta clasificación es que se introduce el concepto de clase de vulnerabilidad para definir los daños de un edificio en base a este. La clase de vulnerabilidad varía dependiendo del tipo de estructura y de material empleado en la construcción. La escala es la que se adjunta a continuación:

Escala Macrosísmica Europea (EMS)		
Grado	Definición	Descripción
1	No sentido	<ul style="list-style-type: none"> - No sentido, ni en las condiciones más favorables. Sólo es registrado por los sismógrafos. - Ningún efecto. - Ningún daño.
2	Apenas sentido	<ul style="list-style-type: none"> - El temblor es sentido sólo en casos aislados (1%) de individuos en reposo y en posiciones especialmente receptivas dentro de edificios. - Ningún efecto. - Ningún daño.
3	Débil	<ul style="list-style-type: none"> - El terremoto es sentido por algunos dentro de edificios. Las personas en reposo sienten un balanceo o ligero temblor. - Los objetos colgados oscilan levemente. - Ningún daño.
4	Ampliamente observado	<ul style="list-style-type: none"> - El terremoto es sentido dentro de los edificios por muchos y por muy pocos en el exterior. Se despiertan algunas personas. El nivel de vibración no asusta. La vibración es moderada. Los observadores sienten un leve temblor o cimbreo del edificio, la habitación o de la cama, la silla, etc. - Golpeteo de vajillas, cristalerías, ventanas y puertas. Los objetos colgados oscilan. En algunos casos los muebles ligeros tiemblan visiblemente. En algunos casos chasquidos de la carpintería. - Ningún daño.
5	Fuerte	<ul style="list-style-type: none"> - El terremoto es sentido dentro de los edificios por la mayoría y por algunos en el exterior. Algunas personas se asustan y corren al exterior. Se despiertan muchas de las personas que duermen. Los observadores sienten una fuerte sacudida o bamboleo de todo el edificio, la habitación o el mobiliario. - Los objetos colgados oscilan considerablemente. Las vajillas y cristalerías chocan entre sí. Los objetos pequeños, inestables y/o mal apoyados pueden desplazarse o caer. Las puertas y ventanas se abren o cierran de pronto. En algunos casos se rompen los cristales de las ventanas. Los líquidos oscilan y pueden derramarse de recipientes totalmente llenos. Los animales dentro de edificios se pueden inquietar. - Daños de grado 1 en algunos edificios de clases de vulnerabilidad A y B.
6	Levemente dañino	<ul style="list-style-type: none"> - Sentido por la mayoría dentro de los edificios y por muchos en el exterior. Algunas personas pierden el equilibrio. Muchos se asustan y corren al exterior. - Pueden caerse pequeños objetos de estabilidad ordinaria y los muebles se pueden desplazar. En algunos casos se pueden romper platos y vasos. Se pueden asustar los animales domésticos (incluso en el exterior). - Se presentan daños de grado 1 en muchos edificios de clases de vulnerabilidad A y B; algunos de clases A y B sufren daños de grado 2; algunos de clase C sufren daños de grado 1.
7	Dañino	<ul style="list-style-type: none"> - La mayoría de las personas se asusta e intenta correr fuera de los edificios. Para muchos es difícil mantenerse de pie, especialmente en plantas superiores. - Se desplazan los muebles y pueden volcarse los que sean inestables. Caída de gran número de objetos de las estanterías. Salpica el agua de los recipientes, depósitos y estanques. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. - Algunos edificios de clase de vulnerabilidad C presentan daños de grado 2. - Algunos edificios de clase de vulnerabilidad D presentan daños de grado 1.

Grado	Definición	Descripción
8	Gravemente dañino	<ul style="list-style-type: none"> - Para muchas personas es difícil mantenerse de pie, incluso fuera de los edificios. - Se pueden volcar los muebles. Caen al suelo objetos como televisiones, máquinas de escribir, etc. Ocasionalmente las lápidas se pueden desplazar, girar o volcar. En suelo muy blando se pueden ver ondulaciones. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. - Algunos edificios de clase de vulnerabilidad D presentan daños de grado 2
9	Destructor	<ul style="list-style-type: none"> - Pánico general. Las personas pueden ser lanzadas bruscamente al suelo. - Muchos monumentos y columnas se caen o giran. En suelo blando se ven ondulaciones. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A presentan daños de grado 5. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. - Algunos edificios de clase de vulnerabilidad E presentan daños de grado 2
10	Muy destructor	<ul style="list-style-type: none"> - La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad A presentan daños de grado 5. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 5. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad E sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. - Algunos edificios de clase de vulnerabilidad F presentan daños de grado 2
11	Devastador	<ul style="list-style-type: none"> - La mayoría de los edificios de clase B de vulnerabilidad presentan daños de grado 5. - La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 4; muchos de grado 5. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad E sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. - Muchos edificios de clase de vulnerabilidad F sufren daños de grado 2; algunos de grado 3.
12	Completamente devastador	<ul style="list-style-type: none"> - Se destruyen todos los edificios de clases de vulnerabilidad A, B y prácticamente todos los de clase C. - Se destruyen la mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad D, E y F. - Los efectos del terremoto alcanzan los efectos máximos concebibles.

Como ya sabemos, nuestro caso de estudio está compuesto por una estructura de muros autoportantes de tapial. Antes de realizar los cálculos, el modelo y ver cómo se comporta la muralla ante sismo, es interesante conocer la vulnerabilidad o el grado de daño esperable para estimar una evaluación a priori. Una vez realizado el modelo y el análisis modal podremos comprobar si la vulnerabilidad estimada corresponde con las consecuencias “reales” que tendría la muralla. Por tanto, a continuación, adjuntamos los datos que se van a utilizar: la clase de vulnerabilidad del Instituto Geográfico Nacional y el tipo de daño que se produce en construcciones de tapial según la escala EMS.

Tipo de estructura		Clase de vulnerabilidad					
		A	B	C	D	E	F
Fábrica	piedra suelta o canto rodado	○					
	adobe (ladrillos de tierra)	○—					
	mampostería	—○—					
	sillería		—○—				
	sin armar, de ladrillos o bloques	—○—					
	sin armar, con forjados de HA		—○—				
	armada o confinada			—○—			
Hormigón Armado (HA)	estructura sin diseño sismorresistente (DSR)	—○—					
	estructura con nivel medio de DSR		—○—				
	estructura con nivel alto de DSR			—○—			
	muros sin DSR	—○—					
	muros con nivel medio de DSR		—○—				
	muros con nivel alto de DSR			—○—			
Acero	estructuras de acero			—○—			
Madera	estructuras de madera	—○—					
— rango probable		○ clase de vulnerabilidad más probable					
— rango de casos menos probables, excepcionales							

Imagen 45: Clases de vulnerabilidad según el tipo de estructura bajo la escala EMS. Fuente: Instituto Geográfico Nacional. (2019).

La muralla tendría una clase de vulnerabilidad A. Es la clasificación más baja de la tabla, por lo que sería una de las primeras edificaciones en sufrir colapso ante grandes acciones sísmicas.

7.5.- Aplicación de la Norma Sísmica Española NCSE-02. Ámbito y criterios de aplicación.

La actual normativa vigente en cuanto sismo para España es la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02). El objeto de esta norma no es otro que el de proporcionar directrices dentro del territorio español para incluir y considerar la acción sísmica en los proyectos, las construcciones, reformas, rehabilitaciones, restauraciones y conservaciones a todos aquellos elementos a los que le son aplicable esta norma.

La entrada en vigor de esta norma (2 de octubre de 2002) supone la derogación de la anterior normativa NCSE-94. En comparación con esta la NCSE-02 supone una actualización en los criterios de actuación, además de tener en cuenta las consideraciones de la normativa sísmica Europea, haciéndola compatible con el Eurocódigo 8.

Respecto a la aplicación en construcciones de tapial como es nuestro caso de estudio se prohíbe el uso de este material en construcciones de carácter normal y especial o cuando la aceleración sísmica es superior a 0,04g (recordemos que la Sevilla es de 0,07g) debido a “la alta vulnerabilidad de estas construcciones,

como ha podido comprobarse en un gran número de terremotos, lo que impide ofrecer las debidas garantías de seguridad y ello llevaría a incumplir la finalidad de la Norma que es la de perder vidas humanas”.⁴

El ámbito de aplicación de la norma se aplica en el proyecto, construcción y conservación, además de los casos de reforma o rehabilitación de las construcciones. Referido a las rehabilitaciones la norma establece que los niveles de seguridad deben incrementarse respecto a su estado inicial o no empeorar.

La norma clasifica las construcciones según los daños que puede ocasionar el colapso o destrucción de este. Es por ello por lo que la muralla se considera de importancia especial ya que al ser considerada Bien de Interés Cultural por los órganos competentes de las Administraciones Públicas su destrucción puede dar lugar a efectos catastróficos.

La NCSE-02 se divide en cuatro capítulos, en los cuales se aporta la información para obtener el nivel de seguridad exigible en los edificios según el grado de su importancia.

- Capítulo 1. Generalidades.
- Capítulo 2. Información sísmica.
- Capítulo 3. Cálculo.
- Capítulo 4. Reglas de diseño y prescripciones constructivas.

La aplicación de la norma es obligatoria para todas las construcciones de importancia especial siempre que no se den una de las siguientes condiciones:

- En las edificaciones de importancia especial cuando la aceleración sísmica básica sea inferior a $0'04\text{ g}$, siendo g la aceleración de la gravedad.

Si la aceleración sísmica básica es igual o mayor de $0'04\text{g}$ deben tenerse en cuenta los posibles efectos del sismo en terrenos potencialmente inestables.

En los casos en que sea de aplicación esta Norma no se utilizarán estructuras de mampostería en seco, de adobe o de tapial en las edificaciones de importancia normal o especial.

Si la aceleración sísmica básica es igual o mayor de $0'08\text{g}$ e inferior a $0'12\text{g}$, las edificaciones de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, o similares, poseerán un máximo de cuatro alturas. Si dicha aceleración sísmica básica es igual o superior a $0'12\text{g}$, un máximo de dos.

Información sísmica de Sevilla.

Ya conocemos la aceleración sísmica de Sevilla gracias al mapa del Instituto Geográfico Nacional (véase imagen 38). Ahora bien, si queremos conocer el valor estimado de la NCSE-02 debemos acudir al mapa de peligrosidad sísmica en el que se representa en un mapa de isostáticas con la aceleración básica en relación al valor de la gravedad. Podemos observar a través de este mapa que la provincia de Sevilla se encuentra en valores comprendidos entre $0,04\text{g}$ y $0,08\text{g}$ por lo que la normativa sísmica es de obligado cumplimiento en cualquier proyecto sea de nueva planta o de rehabilitación.

⁴ NCSE-02.



ab/g	K
0,07	1,1

8.- Ensayo de vibración ambiental.

El pasado 28 de marzo de 2019 se realizaron el ensayo de las vibraciones ambientales en la muralla llevada a cabo por Enrique Vázquez. Este tipo de ensayo en el que se analiza el periodo de vibración de la construcción mediante un proceso no destructivo puede estimarse también las propiedades resistentes de una estructura. En nuestro caso podemos estimar el módulo de elasticidad dinámico (E) para la muralla a partir de la obtención de la frecuencia natural de vibración del elemento y de su periodo.

Es por esto por lo que el objetivo del ensayo no es otro que la obtención del periodo natural de vibración horizontal de la estructura. Cualquier construcción se encuentra sometido a diferentes vibraciones ambientales (el tráfico y el viento son las principales en nuestra estructura). La medida de su periodo nos permite saber cuál es el comportamiento del edificio ante esas acciones, y, además, podremos deducir su rigidez estructural. De esta forma también podremos calcular el índice de vulnerabilidad de la estructura y si es necesario reforzarla para cumplir con unos valores de seguridad.

La Ley de Hooke es aquella que relaciona la rigidez y la tensión para un elemento en régimen elástico. La fórmula que la define es la siguiente:

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Siendo,

E = Módulo elástico de deformación (Módulo de Young).

σ = Tensión.

ε = Deformación unitaria.

A continuación, se explicarán los pasos llevados a cabo durante la medición de las vibraciones ambientales y los resultados obtenidos en ella.

8.1.- Método aplicado.

Este método se basa en la excitación natural que poseen las estructuras. Las vibraciones ambientales excitan al edificio respondiendo con una oscilación y es esta la que nos aportará la información para hallar el periodo y el módulo de elasticidad del elemento.

El ensayo se realiza mediante un acelerómetro de fuerza balanceada, un dispositivo capaz de medir las oscilaciones. La diferencia entre un acelerómetro de fuerza balanceada de uno que no lo es radica en el rango de frecuencias que mide. En este caso llega hasta 0 Hz cuando normalmente captan hasta 0,10 Hz.

Los datos que emite el acelerómetro son filtrados a través de un Conversor analógico digital, que nos permite mediante software, recoger la información por un ordenador portátil.

Para realizar las mediciones ambientales, se disponen diferentes puntos de medición en la zona superior de la muralla. En concreto las mediciones se realizan en uno de los portillos abiertos para el tránsito a principios del siglo XX. Ese será el punto fijo de la medición. Además de este, se colocarán otros tres puntos a cada lado que llegarán hasta las torres como podemos apreciar en la siguiente imagen:

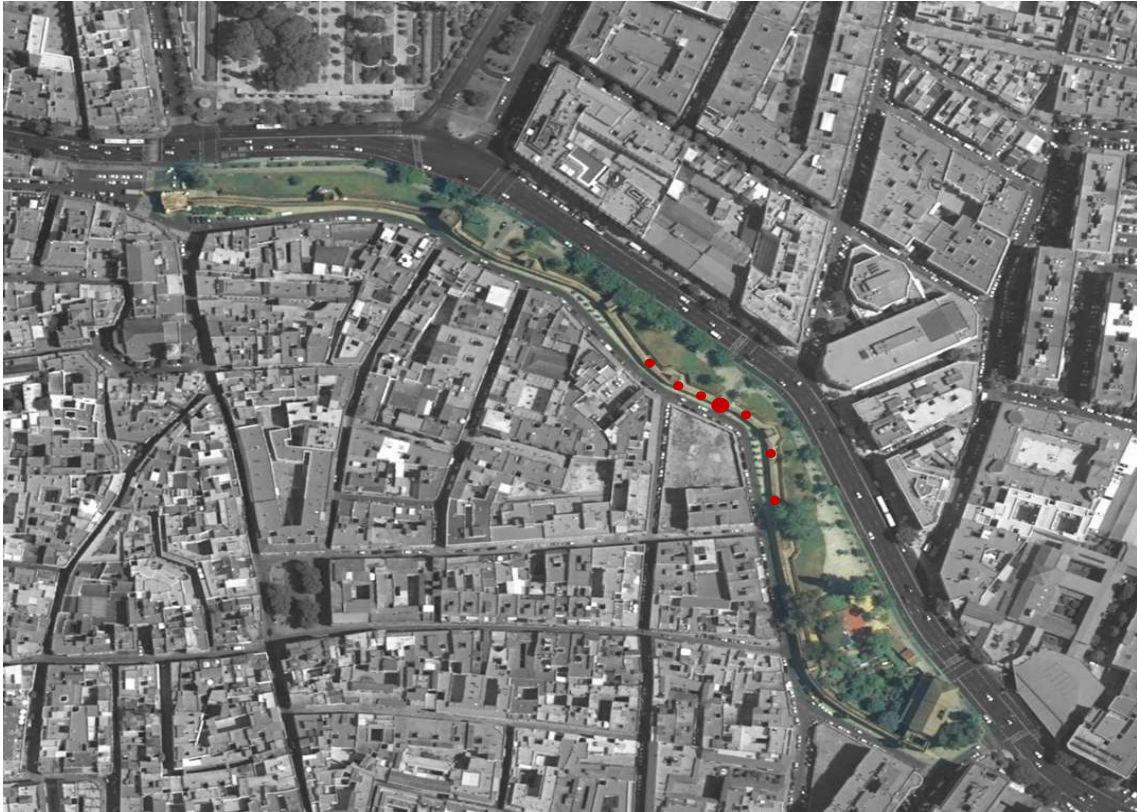


Imagen 47: Esquema de colocación de los acelerómetros. Fuente: propia.

Con estos puntos y utilizando un equipo de un canal se mide la vibración en la parte superior de la muralla y se obtienen datos de frecuencia y aceleración en direcciones transversal y longitudinal.



Imagen 48-49: Equipo utilizado durante la medición. Fuente: propia.

En el espectro de Fourier de la vibración de la estructura la máxima amplitud espectral de menor frecuencia que se encuentra dentro del intervalo de frecuencias propias posibles del edificio.⁵ Es por ello por lo que se deben tomar múltiples medidas. En nuestro caso se realizan mediciones visibles cada 6 minutos al ser la

⁵ Ruiz Jaramillo, J. (2012) *Comportamiento sísmico de edificios históricos. Las iglesias mudéjares de Sevilla.*

muralla considerada como una ménsula corta. Con esto se generan gráficos Amplitud-Frecuencia para cada una de las medidas que permiten el análisis de forma adecuada.

El proceso seguido se explica mediante el siguiente diagrama:⁶

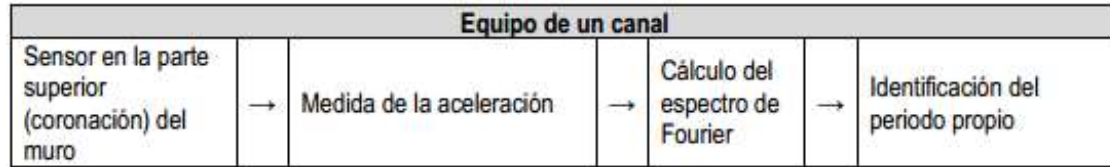


Imagen 50: Diagrama equipo de un canal. Fuente: Jaramillo Ruiz, J. (2012) *Comportamiento sísmico de edificios históricos. Las iglesias mudéjares de Sevilla*.

Podemos apreciar en el diagrama anterior que el software que analiza y transforma las señales del acelerómetro realiza el análisis real de promedio del espectro de Fourier.

Una vez obtenidos los resultados debemos eliminar posibles vibraciones procedentes de otras fuentes de excitación diferentes a las ambientales que pueden alterar los resultados finales.

8.2.- Equipo utilizado.

La medida de vibraciones ambientales se realizó con el equipo de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla, más concretamente del Departamento de Mecánica de Medios Continuos el cual está formado por:

- Acelerómetro de fuerza balanceada triaxial.
- Dispositivo GPS que localiza los acelerómetros en unas coordenadas.
- Conversor analógico digital, encargado de registrar la señal procedente del acelerómetro e interpretarla digitalmente.
- Router Wi-Fi que envía las medidas del acelerómetro al portátil.
- Ordenador portátil con el software específico para analizar las señales recibidas.

8.3.- Resultados de los ensayos de vibración ambiental.

Las gráficas de resultados no han sido cedidas por Enrique Vázquez por lo que lo único que tenemos son las frecuencias medidas en Hz. Las mediciones han dado valores de 6 Hz en el punto fijo colocado en el portillo que se abrió en 1911, mientras que en los puntos más alejados se ha obtenido una frecuencia de 16 Hz.

⁶ Ruiz Jaramillo, J. (2012) *Comportamiento sísmico de edificios históricos. Las iglesias mudéjares de Sevilla*.

8.4.- Estimación del periodo de la muralla.

En la NCSE-02 aparecen una serie de fórmulas, dependiendo del material de la estructura, para estimar de forma aproximada el periodo de vibración de un edificio. En nuestro caso debemos elegir la fórmula perteneciente a la categoría “Edificios con muros de fábrica de ladrillo o bloques” que es la siguiente:

$$T_F = 0,06H\sqrt{H/(2L + H)} / \sqrt{L}$$

Siendo,

- H = altura de la edificación sobre rasante en m.
- L = dimensión en planta en el sentido en el que consideramos la oscilación en metros.

Conociendo que H = 8 m y L = 2 m la fórmula queda como la siguiente:

$$T_F = 0,06 \cdot 8 \sqrt{8/(2 \cdot 2 + 8)} / \sqrt{2} = 0,07 \text{ s}$$

El periodo obtenido es de **0,07 s**

9.- Estudio de la muralla mediante la introducción del modelo a SAP2000.

9.1.- Características y método de cálculo empleado (método de elementos finitos).

Para realizar el análisis dinámico y modal de la muralla por el que mediremos las acciones que se transmiten a la estructura mediante un sismo utilizaremos el software SAP2000 versión 20. Este programa ha sido desarrollado por CSI (Computers & Structures, Inc.). SAP2000 es un programa de cálculo de estructuras que se basa en el Método de Elementos Finitos (MEF) para analizar dichas estructuras.

Posee un interfaz gráfico 3D que permite modelar, analizar y dimensionar la gran mayoría de estructuras que se realizan en la actualidad mostrando los esfuerzos y deformadas de las mismas.

Cabe destacar un par de aspectos que tendremos en cuenta a la hora de realizar y analizar el modelo que serán las siguientes.

- Al ser un programa desarrollado en California (EE. UU.) no contempla toda la normativa mundial, por lo que no está introducido el Código Técnico de la Edificación o la NCSE-02 en su base de datos. Si que está incluido los Eurocódigos.
- SAP2000 es compatible con multitud de programas incluido BIM. Por lo que por mayor facilidad realizaremos el modelo en el programa Autocad2015 de Autodesk.

9.2.- Levantamiento del modelo.

Premisas de partida.

Antes de desarrollar el modelo de la muralla en Autocad2015 y exportarlo a nuestro programa de cálculo SAP2000, es necesario conocer unas consideraciones previas con el fin de realizar el modelo acorde a su comportamiento estructural.

En SAP2000 existen tres tipos de elementos que poseen propiedades y tienen un funcionamiento estructural distinto. Estos elementos son:

- Elemento "Shell". Este tipo posee grados de libertad rotacionales como traslacionales por lo que son capaces de resistir tanto fuerza como momentos.
- Elemento "Plane". Estos elementos son sólidos de dos dimensiones que poseen grados de libertad traslacionales por lo que solo pueden resistir fuerzas y no momentos.
- Elemento "Asolid". Son sólidos con simetría axial con grados de libertad traslacionales que al igual que los elementos "Plane" pueden soportar fuerzas, pero no momentos.

Para nuestro modelo se han empleado elementos "Shell" para definir los lienzos de nuestra muralla. Los elementos "Shell" a su vez, se subdividen en tres dependiendo del tipo de esfuerzos a los que se someten.

- Membrane. Se comporta como una membrana y solo soporta fuerzas y momentos aplicados en su plano, de forma que sufre deformaciones y rotaciones en el eje local 3. Se utilizan para muros que trabajan a cortante.
- Plate. Tiene un comportamiento como el de una placa trabajando solo a momentos y fuerzas perpendiculares a su plano, deformándose en el eje 3 y rotando en los ejes 1 y 2. Empleado en el modelado de forjados, puesto que trabajan principalmente a flexión.
- Shell. Estos elementos combinan el comportamiento de los dos anteriores, haciendo que pueda resistir cualquier tipo de fuerzas y momentos y desplazándose y rotando en todos los ejes locales.⁷

⁷ VV. AA.(2009). SAP2000 Basics, 40

De nuevo volvemos a elegir el subelemento “Shell”. En este subtipo debemos definir parámetros como el espesor (“thickness”) a través de los valores de “membrane” y “bending”. Estos valores sirven para calcular la rigidez, el peso propio y la masa de las secciones. En nuestro caso ambos parámetros tendrán el mismo valor.

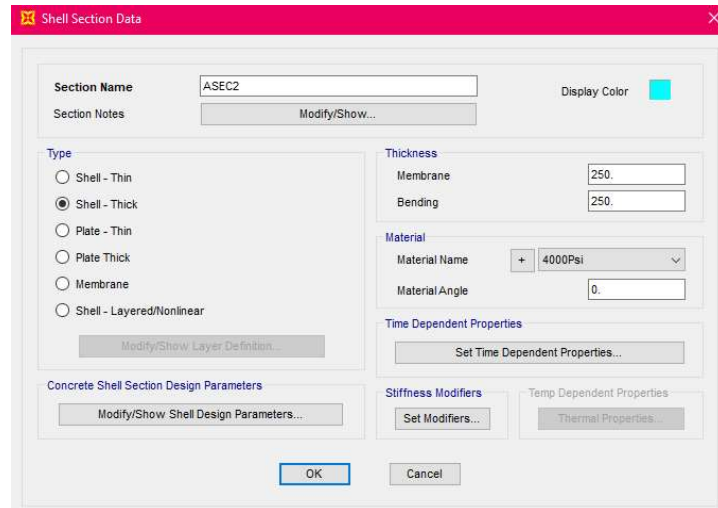


Imagen 51: Interfaz de la definición de un elemento Shell. Fuente: propia.

También debemos introducir otros parámetros relacionados con las fuerzas que producen las deformaciones en nuestro modelo. El parámetro “thin” debemos utilizarlo siempre que la deformación sea producida por la flexión (placas delgadas), si de lo contrario los esfuerzos que deforman son los de flexión y cortante utilizaremos “thick” (placa gruesa).

Se recomienda que si la relación entre la longitud y el espesor del elemento es $L/e > 20$, se debe utilizar la combinación “shell thin”, si es inferior a 20 empleamos “shell thick”. En nuestro caso, si realizamos una estimación obtenemos los siguientes resultados (realizaremos la estimación en las direcciones 1 y 2):

	L (m)	H (m)	e (m)	L/e	H/e
	500,00	8,00	2,00	250,00	4,00
Tipo de elemento				thick	thick

Siendo:

- L = longitud de la muralla
- H = altura.

Podemos ver que en ambas direcciones nos encontramos con el parámetro más recomendable a escoger es el de “shell thick”. Esto tiene sentido ya que las fuerzas sísmicas actúan en dirección perpendicular a los elementos y con el gran espesor que posee la muralla por lo que es la opción más adecuada para analizar nuestro modelo.

Proceso de caracterización. Construcción del modelo en Autocad.

Como hemos comentado anteriormente el programa SAP2000 permite importar los archivos .dwg/.dxf producidos en Autocad. Es por esto que el modelo geométrico lo desarrollaremos con este programa. La experiencia nos dice que aún el programa no soporta bien la extensión .dwg, por lo que lo importaremos desde un archivo .dxf versión 2000.

Para modelar recurriremos al comando “3DCARA” que nos permitirá definir los elementos “shell” en SAP2000 sin problema.

Para que el modelo no sufra problemas a la hora de su exportación debemos tener en cuenta que los elementos shell solo puede estar definidos por tres o cuatro puntos (también definidos como nodos). Debido a los problemas y dificultades que presenta el programa a la hora de calcular elementos de tres nodos, tomamos como criterio que el mallado de la muralla será definido por elementos de 4 nodos. De esta forma coincide también con los cajones de los que se compone. Solo se emplearán elementos de 3 nodos en los merlones debido a su geometría.

Es importante no dejar elementos “3DCARA” en la capa “0” debido a que esta capa no es exportable a SAP2000. También tenemos que tener en cuenta que debemos separar los elementos según su composición en diferentes capas.

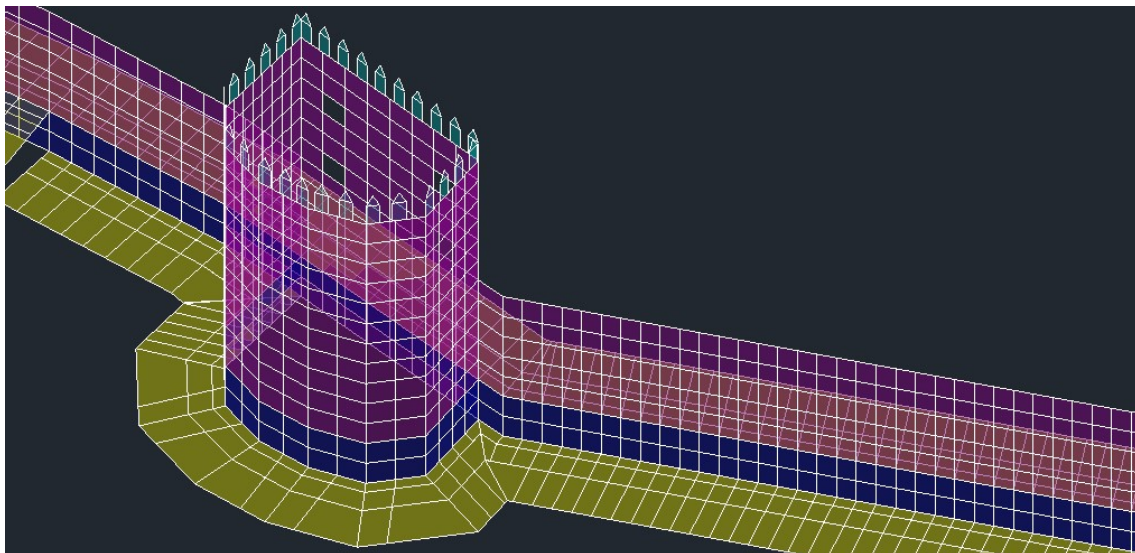


Imagen 52: Tramo de la muralla modelado en Autocad2015. Fuente: Propia.

A la hora de realizar nuestro modelo tenemos en cuenta que la muralla se comporta estructuralmente como una ménsula corta empotrada en el suelo. Es por ello por lo que es importante discretizar el suelo que le rodea además de la muralla.

Tomamos como modelo final la siguiente imagen:

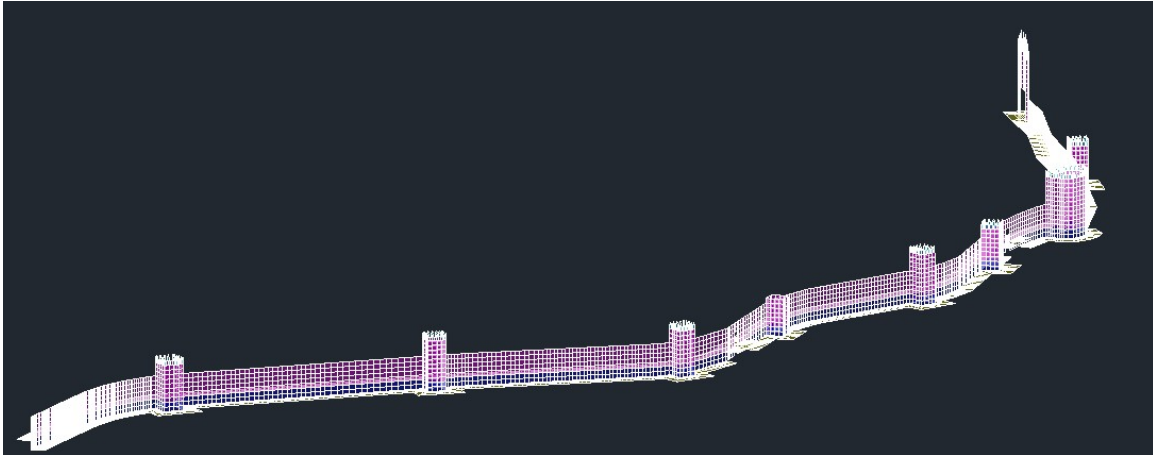


Imagen 53: Muralla modelada al completo en Autocad2015. Fuente: Propia.

El mallado para que realice un análisis exhaustivo debe ser denso. Es por ello por lo que se han tomado los siguientes criterios:

- La muralla estará compuesta por un mallado de elementos de cuatro nodos con una medida aproximada de 1x1 m, de forma que dos elementos conformen un cajón de los que se compone los lienzos.
- El suelo se discretizará en tres capas de 0,50; 1 y 2 metros de espesor a medida que nos alejamos de la muralla.

Definición de materiales.

El primer paso tras introducir el modelo en el SAP2000 es el de definir los materiales de los que se compone nuestro modelo. Para nuestro caso serán dos los materiales principales: el tapial y el suelo. Accedemos a *Define > Materials... > Add New Material* donde SAP2000 nos ofrece un pequeño catálogo de materiales según la normativa de cada país. En este no viene definido nuestros materiales por lo que será necesario crearlos a través de la definición de los parámetros que lo caracterizan.

Para el tapial las características serán las siguientes:

- Masa por unidad de volumen (densidad): 20 kg/m³
- Módulo de elasticidad, E: 12000 – 6000 kPa
- Coeficiente de Poisson, U: 0,28
- Coeficiente de dilatación térmica, A: 0,012 mm/m °C

* Se introducen estos dos valores de módulos de elasticidad para que el valor inferior vaya dirigido a las partes más erosionadas de la muralla donde la pérdida de sección es notable. Se estima que la pérdida de sección de un 30% equivale a una reducción del 50% del módulo de elasticidad. Por lo tanto, existirían dos versiones del tapial.

Para el suelo las características serán siguientes:

- Masa por unidad de volumen (densidad): 19,81 kg/m³
- Módulo de elasticidad, E: 10000 kPa
- Coeficiente de Poisson, U: 0,30
- Coeficiente térmico de expansión A: 1,17 x10⁻⁵ mm/m °C

Definición de secciones.

Justificamos la definición de las secciones en el apartado *"Proceso de caracterización. Construcción del modelo en Autocad."*

Definición de vínculos.

Los vínculos externos son los referidos a la unión entre el muro y el suelo. Tal y como hemos dicho anteriormente concebimos el modelo de la muralla como una ménsula corta que está empotrada al suelo. Por ello nos dirigiremos a *Assign > Joint > Restraints...* y, una vez ahí, elegimos la opción de empotramiento para restringir los giros en los ejes X, Y y Z (llamados en el programa 1, 2 y 3). Empotraremos, además, las torres a la muralla para arriostrar la estructura.

Los vínculos internos son las uniones o conexiones entre los diferentes elementos de nuestro mallado. Por defecto, los vínculos internos en SAP2000 son considerados como nudos rígidos que coincide con el tipo de vínculo que aplicamos a nuestro modelo.

Definición de cargas.

Las cargas que introduciremos en el programa serán las siguientes:

- Peso propio.

El peso propio lo considera el programa SAP2000 de forma automática a partir de la densidad de los materiales.

- Sobrecargas.

Las sobrecargas que actuarán en nuestra muralla será la sobrecarga de uso de un valor de 1 kN/m² (el mínimo según CTE-DB-AE para asegurar el mantenimiento de estas) y la nieve que para Sevilla tiene un valor de 0,40 kN/m² (CTE-DB-AE).

- Viento.

Teniendo en cuenta el CTE-DB-SE la combinación de acciones para situaciones sísmicas el coeficiente de simultaneidad en acciones eólicas es $\psi_2 = 0$. Al ser el objetivo principal de nuestro estudio consideramos no incluir la acción eólica en nuestro modelo.

También podemos justificar nuestra decisión en el estudio de Gómez de Terreros. Él no considera la acción sísmica pero sí tiene en cuenta el viento en los cálculos de que realiza en los muros de la iglesia de Santa Marina. La elaboración de estos cálculos le hace afirmar que las acciones de viento tienen una escasa influencia en la estabilidad de la fábrica, fundamentalmente debido al espesor del elemento.⁸

⁸ Gómez de Terreros, P. *Análisis de los templos parroquiales en la ciudad de Sevilla: Santa Marina.*

- Acción sísmica.

Debemos definir el espectro de respuesta modificado para aplicarla como aceleración de cálculo para poder determinar los esfuerzos a los que se ve sometida la muralla bajo la acción sísmica.

Para ello recurriremos al trabajo de Jaramillo en el que calcula dicho espectro de respuesta modificado para la ciudad de Sevilla.⁹

En su estudio parte de la aceleración que transmitiría el máximo sismo esperable en Sevilla para obtener así los resultados más desfavorables. Este dato lo extrae del estudio que ha realizado de las intensidades sísmicas de los terremotos registrados históricamente.

La crónica sísmica de Sevilla da como conclusión que la intensidad máxima que puede darse en la ciudad en escala EMS es VIII.

Este valor le ha servido para definir el espectro de respuesta modificado a partir del formulario de la NCSE-02, apartado 2.2 a partir de las expresiones incluidas en la NCSE-02, apartado 2.2 y multiplicando las ordenadas del espectro de respuesta elástica por el valor de la aceleración sísmica de cálculo, a_c . Analíticamente $\alpha(T) \cdot a_c$.

La aceleración sísmica de cálculo se puede determinar como

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

Siendo,

$$a_b = 0,153g$$

$$\rho = 1,3 \text{ (construcción de importancia especial).}$$

Para un valor de $\rho \cdot a_b$ comprendido entre $0,1g$ y $0,4g$ tenemos que:

$$S = C/1,25 + 3,33 \cdot (\rho \cdot a_b/g - 0,10) \cdot (1 - C/1,25), \text{ siendo } C \text{ el coeficiente de suelo obtenido } C = 1,50.$$

Se obtiene un valor de $S = 1,13$.

Con los valores S , ρ y a_b obtenemos $a_c = 0,22g$.

En la generación del espectro de respuesta tienen una especial incidencia los valores de T_A y T_B . Para su obtención, vamos al apartado 2.3 de la NCSE-02.

$$\text{Si } T < T_A \rightarrow \alpha(T) = 1 + 1,5 \cdot \frac{T}{T_A} \rightarrow \alpha(T)_{\text{mod}} = \left(1 + 1,5 \cdot \frac{T}{T_A} \right) \cdot a_c$$

$$\text{Si } T_A \leq T \leq T_B \rightarrow \alpha(T) = 2,5 \rightarrow \alpha(T)_{\text{mod}} = 2,5 \cdot a_c$$

$$\text{Si } T > T_B \rightarrow \alpha(T) = K \cdot \frac{C}{T} \rightarrow \alpha(T)_{\text{mod}} = \left(K \cdot \frac{C}{T} \right) \cdot a_c, \text{ con } K = \text{coeficiente de contribución.}$$

⁹ Ruiz Jaramillo, J. (2012) *Comportamiento sísmico de edificios históricos. Las iglesias mudéjares de Sevilla.*

La obtención de TA y TB se realiza mediante las siguientes expresiones:

$$T_A = K \cdot C/10$$

$$T_B = K \cdot C/2,50$$

Jaramillo concluye el cálculo con una tabla de los resultados obtenidos que se muestran a continuación:

		T (sg)	α (T)	α (T) mod
		0	1,000	2,211
		0,165	2,500	5,527
		0,66	2,500	5,527
		1,4	1,179	2,605
		1,6	1,031	2,280
		1,8	0,917	2,026
		2	0,825	1,824
		2,5	0,660	1,459
		3	0,550	1,216
		3,5	0,471	1,042
		4	0,413	0,912
		4,5	0,367	0,811
		5	0,330	0,730
		5,5	0,300	0,663
		6	0,275	0,608
		6,5	0,254	0,561
		7	0,236	0,521
		7,5	0,220	0,486
		8	0,206	0,456
		8,5	0,194	0,429
		9	0,183	0,405
		9,5	0,174	0,384
		10	0,165	0,365

a_b (m/s ²)/g	0,153
g (m/s ²)	9,8
a_b (m/s ²)	1,499
K (Coef. Contribución)	1,100
C (Coef. Suelo)	1,5
ρ	1,3
S	1,134
a_c (m/s ²)	2,211
a_c (m/s ²)/g	0,226

Imagen 54: Valores de cálculo obtenidos para la definición del espectro de respuesta en Sevilla. Fuente: Ruiz Jaramillo, J. (2012) Comportamiento sísmico de edificios históricos. Las iglesias mudéjares de Sevilla.

Estos datos serán los que introduzcamos en el modelo en Define > Functions > Reponse Spectrum...

Definición de combinaciones.

Para definir las combinaciones recurrimos al CTE-DB-SE en Estados Límite Últimos yendo al apartado 1 "Resistencia y estabilidad" más concretamente al capítulo 4.2.2 Combinaciones de acciones.

Existen tres combinaciones de acciones:

- Situación persistente o transitoria: Se determina mediante combinaciones de acciones a través de la expresión.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

es decir, considerando la actuación simultánea de:

- todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ($\gamma_G \cdot G_k$).
- una acción variable cualquiera, en valor de cálculo ($\gamma_Q \cdot Q_k$), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis.
- el resto de las acciones variables, en valor de cálculo de combinación ($\gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q_k$).

Los valores de los coeficientes de seguridad, γ , se establecen en la tabla 4.1 para cada tipo de acción. Los valores de los coeficientes de simultaneidad, ψ , se establecen en la tabla 4.2.

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

Tipo de verificación ⁽¹⁾	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
Estabilidad		desestabilizadora	estabilizadora
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		(1)	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

Imagen 55-56: Tablas 4.1 y tabla 4.2 de coeficientes de seguridad y de simultaneidad respectivamente. Fuente: CTE-DB-SE.

En nuestro caso, se han elegido los siguientes coeficientes:

- $\gamma_G = 1,35$; para acción permanente desfavorable.
- $\gamma_Q = 1,50$; para acciones variables desfavorables.
- $\psi_0 = 0$, en acciones variables y el viento.

- Situación extraordinaria: Referidas a situaciones como incendio o impacto que en este caso decidimos obviar y que no nos compete.
- Sismo: Se determina mediante combinaciones de acciones a través de la expresión.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Eliendo el siguiente coeficiente de simultaneidad:

- $\psi_0 = 0$, en acciones variables y el viento.

La introducción de las combinaciones de acciones las realizamos de forma manual ya que al ser el SAP2000 un programa americano carece de la normativa española en su base de datos.

Obtenemos 13 combinaciones que son las siguientes:

- $1'35 \cdot G_k + 1'50 \cdot Q_k$
- $G + S_x$
- $G + S_y$
- $G + S_x(-)$
- $G + S_y(-)$
- $G + S_x + 0'3 \cdot S_y$
- $G + 0'3 \cdot S_x + S_y$
- $G + S_x(-) + 0'3 \cdot S_y$
- $G + 0'3 \cdot S_x(-) + S_y$
- $G + S_x + 0'3 \cdot S_y(-)$
- $G + 0'3 \cdot S_x + S_y(-)$
- $G + S_x(-) + 0'3 \cdot S_y(-)$
- $G + 0'3 \cdot S_x(-) + S_y(-)$

10.- Resultados, análisis y conclusiones.

10.1.- Frecuencia y periodos fundamentales de la estructura. Tensiones y deformaciones.

Los valores de frecuencia y periodos obtenidos en nuestro modelo son los siguientes que se detallan a continuación:

	Periodo (s)	Frecuencias (Hz)
Modo 1	0,58607	1,70628
Modo 2	0,58607	1,70628
Modo 3	0,58607	1,70628
Modo 4	0,58607	1,70628
Modo 5	0,58607	1,70628
Modo 6	0,52577	1,90199
Modo 7	0,43592	2,29400
Modo 8	0,43347	2,30697
Modo 9	0,41473	2,41121
Modo 10	0,41307	2,42092
Modo 11	0,41229	2,42548
Modo 12	0,40787	2,45174

Podemos observar que los valores del periodo rondan entre 0,59 y 0,40 s y las frecuencias entre 2,45 y 1,70 Hz.

En cuanto a los desplazamientos de la muralla observamos que en general es bastante rígida y apenas sufre movimientos o desplazamientos. Cabe destacar que los merlones al ser elementos de pequeño tamaño serán los más propensos ante un sismo de que sufran grandes desplazamientos y puedan caerse ocasionando daños materiales.

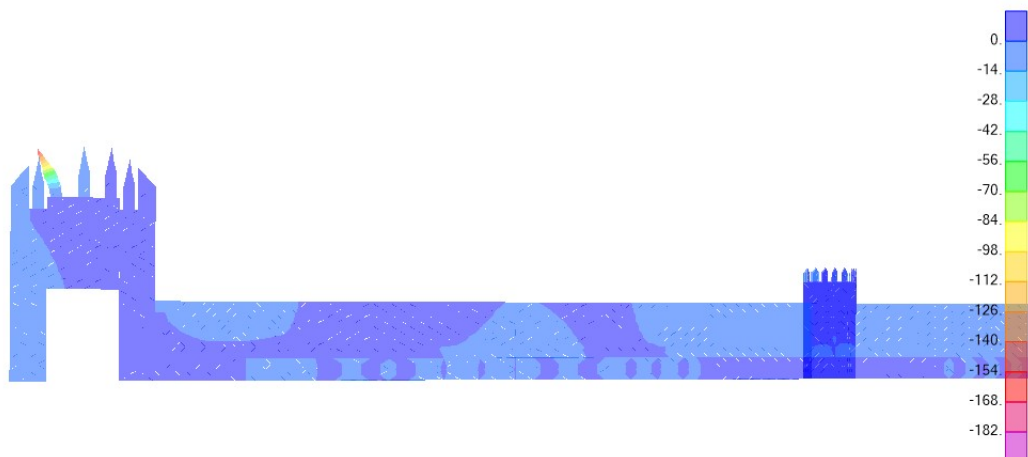


Imagen 57: Análisis modal mediante SAP 2000. Podemos observar que los merlones en algunos modos de vibración sufren grandes desplazamientos produciéndose su colapso y caída. Fuente: propia.

Otro aspecto que destacar es la forma en la que se distribuyen las tensiones. Como hemos especificado en apartados anteriores las torres irían empotradas a la muralla, para que esta quede bien arriostrada y no lo detecte el programa como un mecanismo. Pues bien, podemos ver en las imágenes siguientes como las tensiones se agrupan en las partes centrales de cada lienzo. Estos serían “puntos débiles” que en algunos casos puede provocar el colapso del tapial.

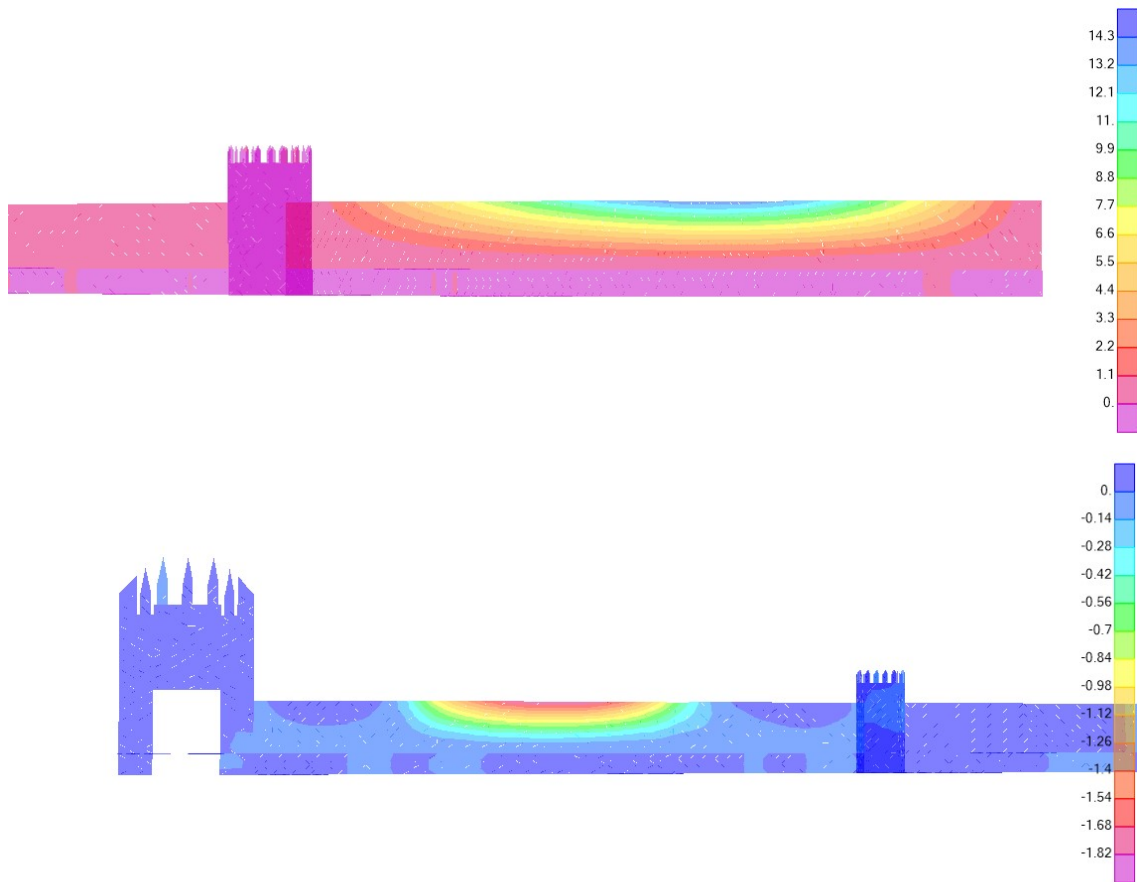


Imagen 58-59: Análisis modal mediante SAP 2000. Desplazamientos en el eje X con leyenda en milímetros. Se aprecian grandes movimientos en el centro de los lienzos. Fuente: propia.

Si analizamos los portillos abiertos en el año 1911 podemos ver como el lienzo se puede ver comprometido identificando la zona como débil y pudiendo llegar al colapso en algunos modos.

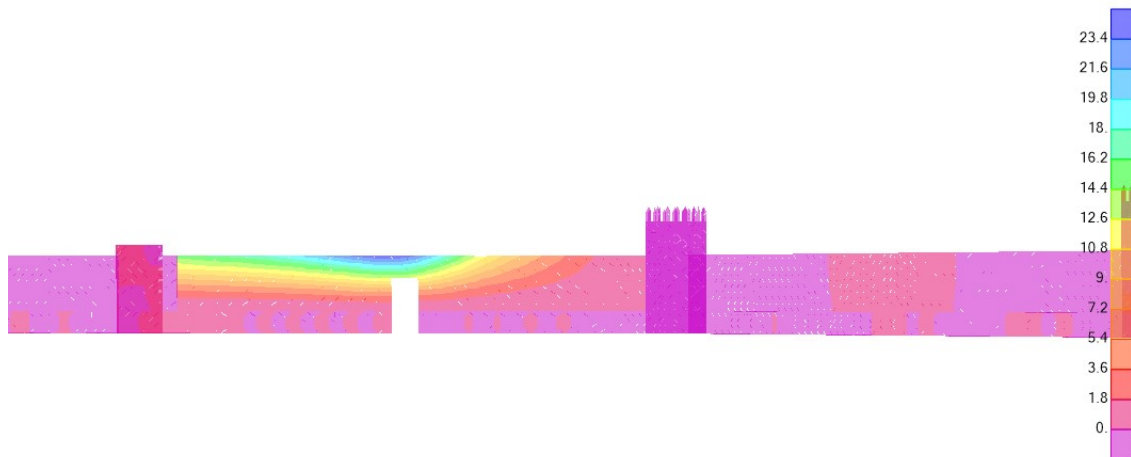


Imagen 60: Análisis modal mediante SAP 2000. Fuente: propia.

A título de curiosidad, la muralla posee mayores desplazamientos en un sismo en los modos de vibración últimos, es decir, en aquellos en los que el periodo es más bajo pero la frecuencia mayor.

10.2.- Relación entre el periodo obtenido mediante vibración ambiental, cálculo y modelo.

Se han realizado tanto ensayos de vibraciones ambientales, como cálculos realizados con la NCSE-02 y un modelo a través de elementos finitos con el fin de obtener los diferentes resultados y realizar una comparativa entre ellos.

El fin de esta comparativa no es otros que validar el uso de modelos de elementos finitos para estudiar edificios y bienes patrimoniales donde es esencial el hecho de que estos estudios son no destructivos. Teniendo en cuenta esto podemos obtener que:

- $T_{festimada} \geq T_{fensayo}$ o $f_{festimada} \leq f_{fensayo}$. En este caso la muralla estaría arriostrada de forma correcta y soportaría las acciones sísmicas.
- $T_{fensayo} \geq T_{festimada}$ o $f_{fensayo} \leq f_{festimada}$. Aquí la muralla podría tener problemas a la hora de su estabilización horizontal ante sismo, siendo necesario un correcto arriostramiento. Si la muralla estuviera en este apartado sería necesario reforzarla hasta asegurar su estabilidad.

A continuación, se adjunta una tabla comparando los tres resultados obtenidos:

	Mediciones ambientales	SAP2000	Cálculos según NCSE-02	Frecuencia natural (fu)
Periodo (s)	0,06 – 0,16	0,58 (Modo 1) 0,40 (Modo 12)	0,07	-
Frecuencia (Hz)	16 - 6	1,70 (Modo 1) 2,45 (Modo 12)	14,28	5

A partir de estos resultados podemos considerar si es necesario o no el refuerzo de la estructura de la muralla por cuestiones sísmicas. Según diferentes autores los valores medios que debe tener un edificio de estas características son:

- Frecuencias entre 2 y 10 Hz.
- Periodo que oscile entre 0,10 y 0,50 s.

Podemos apreciar en la tabla como el periodo medido mediante el modelo de elementos finitos es superior a las estimaciones de la NCSE-02 y de las mediciones ambientales. Con esto podemos ver que sería necesaria una reconsideración del modelo siendo muchos más exhaustivos. O también puede ser una comprobación que los modelos de elementos finitos no pueden ser utilizado de forma 100% fiable en materiales como la roca, el adobe o el tapial ya que el mallado podría romper la continuidad del elemento.

Además, podemos apreciar como las mediciones realizadas cercanas a las torres son inferiores a la de cálculo, por lo que no sería necesario el refuerzo de la estructura en dichos puntos. Sin embargo, justo encima del portillo donde estaba colocado uno de los acelerómetros las mediciones del periodo son muy superiores a las de la normativa siendo necesario un refuerzo en dicho punto.

A pesar de que los resultados del periodo y la frecuencia no coinciden demasiado con los del SAP2000 si podemos ver en el programa que nos ha marcado como puntos débiles las partes centrales de los lienzos coincidiendo con la toma de datos in situ.

Debemos recordar también que, aunque en los extremos de los lienzos sean rígidos no quiere decir que pueda resistir las tensiones producidas tras la acción sísmica, por lo que sería necesario realizar un estudio de las tensiones máximas admisibles en la muralla y comprobar que todos los puntos lo cumplen.

10.3.- Conclusiones.

En este apartado introducimos todas las conclusiones que se han realizado a lo largo de estudio, con el fin de que se encuentren recopiladas en un mismo punto.

- Aunque vemos que el riesgo de terremotos puede ser pequeño comparado con otras acciones catastróficas puede ser reducido si tomamos las medidas necesarias para ello. Es necesario conocer la historia de la sismología para protegernos de futuros sismos.
- Desde el aspecto Patrimonial, es muy necesario que los bienes inmuebles estén protegidos y reforzados frente a las acciones sísmicas ya que es la segunda causa de la desaparición del patrimonio en la historia.
- La normativa NCSE-02 sitúa a la región andaluza con un peligro sísmico moderado. Han sido varios terremotos a lo largo de la historia los que asolado y destruido ciudades. Sin embargo, la normativa sismorresistente carece de criterios de intervención a la hora de su rehabilitación. Tampoco se encuentran directrices en el Código Técnico de la Edificación.
- La modelización informática de la muralla a través de elementos finitos nos ha servido como un estudio complementario de las mediciones y cálculos. Además de una forma visual apreciar qué zonas de la muralla pueden considerarse “puntos débiles” sin tener que recurrir a la medición de la muralla en su totalidad.
- Se insta a realizar un estudio sobre las tensiones máximas que puede soportar la muralla para saber cuáles son los puntos de esta que deben ser reforzados.
- Gracias a la comparativa entre las mediciones de vibraciones ambientales y el cálculo mediante la normativa podemos avalar que este método es válido para obtener el periodo natural de un edificio.

- Por último, podemos observar que la muralla se ha podido conservar en pie hasta nuestros días debido a su compartimiento estructural. Esto es debido principalmente al espesor que posee el muro.

11.- Continuidad en la línea de trabajo. / Líneas de trabajo en posibilidad de desarrollo.

Tras desarrollar este estudio se plantean nuevas líneas de estudio con la ampliación de la labor de este Trabajo Fin de Grado.

- Seguir ampliando el modelo de SAP2000 actual en el que se haga un estudio más detallado de los nudos y uniones que presenta la muralla, así como los diferentes materiales empleados en sus restauraciones.
- Importar el modelo realizado en SAP2000 a BIM con el fin de seguir estudiando la muralla sin realizar en ella ensayos de carácter destructivo.
- Ampliar catálogo de Patrimonio Histórico introduciendo programas de modelaje de elementos finitos con el objetivo de realizar análisis y detectar futuros fallos y riesgos sin poner en riesgo el Bien Patrimonial.
- Realizar “manuales de intervención” en el patrimonio en el que los parámetros sean más amplios que los existentes a día de hoy. Por ejemplo, podemos observar que el uso de tapial en la muralla no pone en riesgo a la estructura. Esto es debido a su escasa altura y gran rigidez.

12.- Referencias empleadas.

13.1.- Bibliografía.

- Afanador García, N., Carrascal Delgado, M., Bayona Chinchilla, M. J. (2013) Experimentación, comportamiento y modelación de la tapia pisada. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*.
- (Anónimo) *La acción sísmica en las normativas*.
- (Anónimo) *Análisis sísmico*.
- Arango González, J. R. (1994) *Análisis de terremotos históricos por sus efectos, El terremoto de Andalucía*. Barcelona, España. Editorial: A.H. Barbat.
- Arroyo Portero, J. C., Sánchez Fernández, R., Romero Ballesteros, A., (2011) *Números gordos en el proyecto de estructuras*. España. Editorial: Cinter Divulgación Técnica.
- Calabuig Presencia, P. *Estudio, análisis y modelización mediante SAP2000 de la estructura de un edificio relevante de la arquitectura moderna y contemporánea*. Valencia, España.
- Canivell García de Paredes, J., (2008) *Puesta en valor de fortificaciones en tapial. La muralla de Sevilla*.
- Cardoso Bueno, D. (2006) *Sevilla. El casco antiguo. Historia, arte y urbanismo*. Sevilla, España. Editorial: Guadalquivir ediciones.
- Cobreros Vime, M. A. (2004) Análisis de estructuras de obra de fábrica. *Revista Star: Structural Architecture*, 11, 90.
- de Mata Carriazo, J. *Dossieres*.
- de Mena, J. A., (2010) *Historia de Sevilla*. Madrid, España. Editorial: Plaza Janés.
- Espinoza, F. Canas, J. A. Pujades, L. G. Caselles, O. Mena, U. (2000) *Utilización de la vibración ambiental como fuente de excitación para el cálculo de periodos fundamentales de edificios*. Madrid, España Editorial: Ministerio de Fomento, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.
- García Erviti, F. (2014) *La valoración de los inmuebles del patrimonio histórico y los riesgos sísmicos en el contrato de seguro: El caso de Lorca*. Madrid, España. Editorial: Fundación Mapfre.
- Gentil Govantes, P. (1989) *El riesgo sísmico de Sevilla*. Sevilla, España. Editorial: Universidad de Sevilla.
- Gómez de Terreros, P (2001) Análisis de los templos parroquiales en la ciudad de Sevilla: Santa Marina. Sevilla, España. Editorial: Universidad de Sevilla.
- González Durán, M. *Obtención del periodo fundamental de vibrar en edificaciones de mampostería*. México. Editorial: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Husid L., R. (1963) *Cálculo del periodo fundamental de vibración de edificios con rigidez de corte*. Primeras Jornadas Chilenas de Ingeniería Antisísmica.
- Instituto de la Construcción y del Cemento "Eduardo Torroja" (1971) *P.I.E.T. 70: prescripciones del Instituto Eduardo Torroja: obras de fábrica*. Madrid, España. Editorial: IETcc.
- Jaramillo Morilla, A. (1983). *Método probabilista e integrado de estimación de las acciones sísmicas*.
- Jaramillo Morilla, A., Rehbein, K., Mascort Albea, E., Ruiz Jaramillo, J., Martín, A. J. *El sismo en el patrimonio arquitectónico*.
- Jaramillo Morilla, A., Mascort Albea, E., Sánchez Langeber, J. M., Soriano Cuesta, C., Mora Santiesteban, M., Ruiz Jaramillo, J., (2015) *Proyecto de guía para la rehabilitación sísmica de edificios e infraestructuras existentes en Andalucía. Guía técnica para rehabilitación de edificios e infraestructuras en Andalucía*.
- Jiménez Maqueda, D., (1996) *La puerta de la Macarena. Un ejemplo de dispositivo poliocético almohade en la muralla almorávide de Sevilla*. Extremadura, España. Editorial: NORBA-ARTE.

- Jiménez Maqueda, D., (2016) Las fortificaciones almohades de *Madinat Isbilía* en el contexto de la arquitectura militar de Al-Ándalus (I). Editorial: Conserjería de Educación de la Junta de Andalucía.
- Justo Alpañés, J. L., Jaramillo Morilla, A., Gentil Govantes, P. (1998) *Comportamiento de los monumentos de Sevilla bajo la acción de los terremotos*. Ingeniería civil, 109.
- Lavado Rodríguez, J., Granados Romera, J. J., (2012) *Cálculo de estructuras con el programa SAP2000*. Granada, España, Editorial: Universidad de Granada.
- Martín Rodríguez, A. (2017) *Predicción de deterioro y Conservación Preventiva mediante sistemas BIM de la muralla del Recinto I del Real Alcázar de Sevilla (Casas 7 y 8 del Patio de Banderas)*.
- Morales Padrón, A. Blanco Freijeiro, A. (1992) *Historia de Sevilla*. Sevilla, España. Editorial: Universidad de Sevilla.
- Passolas, J. (2006) *Apuntes para conocer Sevilla*. Sevilla, España. Editorial: Guadalquivir ediciones.
- Posadas Chinchilla, A. M., Vidal Sánchez, F., (1994) *El estudio de los terremotos en Almería*. Almería, España. Editorial: Instituto de Estudios Almerienses.
- Roldán Ruiz, J. (2012) *Experiencias para un Protocolo Técnico de Actuación tras Terremotos*. Murcia, España. Editorial: Fundación Universitaria San Antonio.
- Ruiz Jaramillo, J. (2012) *Comportamiento sísmico de edificios históricos. Las iglesias mudéjares de Sevilla*. Sevilla, España. Editorial: Universidad de Sevilla.
- Samartín Quiroga, A., (2008) *Curso de Ingeniería Sísmica (I): La acción sísmica*. Madrid, España. Editorial: Colegio e ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Torres Gilles, C., Jorquera Silva, N., (2018) *Técnicas de refuerzo sísmico para la recuperación estructural del patrimonio arquitectónico chileno construido en adobe*. Informes de la Construcción (550).

13.2.- Leyes y normativa.

- Normativa de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02)
- Eurocódigo 6.
- Código Técnico de la Edificación.